MARCELO RAMOS DE ALBUQUERQUE BARROS

ESTUDO DA AUTOMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA PARA MONTAGENS E SOLDAGEM INDUSTRIAL DE CARROCERIAS AUTOMOTIVAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

São Paulo
2006

MARCELO RAMOS DE ALBUQUERQUE BARROS

ESTUDO DA AUTOMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA PARA MONTAGENS E SOLDAGEM INDUSTRIAL DE CARROCERIAS AUTOMOTIVAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Automotiva

São Paulo
2006

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor com a anuência do orientador

São Paulo, ____ de ________________de _______

Assinatura do autor ....

Assinatura do orientador ....

FICHA CATALOGRÁFICA

Barros, Marcelo Ramos de Albuquerque
Estudo da automação de células de manufatura para montagens e soldagem industrial de carrocerias automotivas / M.R. de A. Barros. – ed.rev. -- São Paulo, 2006.
133 p.

Trabalho de curso (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1.Células de manufatura (Automação) 2.Carroçaria 3.Soldagem 4.Engenharia automotiva I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica II.t.

À minha mulher Naíla e minha filha Beatriz,
pelo amor, incentivo e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha , agradeço pelos conselhos e ensinamentos, pela atenção e paciência dedicados a mim, sem os quais o presente trabalho não se concretizaria.

À Volkswagen e a Phoenix Contact do Brasil, por permitir a publicação dos dados e informações contidas neste trabalho.

Aos tios Stella e Victor, Simone e Beto, que pacientemente me receberam em seus lares durante o curso.

RESUMO

A proposta deste trabalho é apresentar uma solução de arquitetura de automação padronizada para controle de células de montagem de carrocerias automotivas de baixo custo e de alta performance. Obteve-se o resultado após a análise das propostas dos principais fabricantes de tecnologias de CLP's e redes de comunicação e controle, comparando-se as recentes instalações em algumas plantas da área automotiva. Apesar dos resultados financeiros ainda não serem atestados até a data de publicação deste trabalho, as vantagens técnicas poderão ser comprovadas. A busca por essa arquitetura de controle foi motivada pela implantação da nova família de veículos intitulada VW 23x. Entre as características da arquitetura apresentada está a estruturação do programa de CLP nas duas principais linguagens previstas na norma IEC 61131-3: a SFC (Sequenciamento Gráfico de Funções) e a FB (Blocos Funcionais). A estruturação da arquitetura de software é original em relação à utilização da linguagem SFC para este tipo de aplicação, e oferece um diagnóstico mais preciso de falhas da seqüência operacional quando comparado a outras soluções. Outra vantagem apresentada nesta arquitetura de automação, até então inédita no grupo Volkswagen, diz respeito à integração da rede de dispositivos de entradas e saídas de controle de processo e de segurança, proporcionando uma instalação mais simples.

Palavras-Chave: Automação, CLP, Células de Manufatura, Montagem, Soldagem, Carrocerias e Engenharia Automotiva.

ABSTRACT

STUDY ON AUTOMATION OF MANUFACTURING CELLS FOR ASSEMBLING AND WELDING OF AUTOMOTIVE BODY IN WHITE

The proposal of this work is to present a solution of standardized automation architecture for the control of assembly cells of low cost and high performance automotive body in white. The result obtained was accomplished analyzing the proposals of the main manufacturers of CLP technologies and communication and control nets and, making comparisons among recent installations in some automotive area plants. In spite of the financial results not being able to be corroborated up to the date of the publication of this work, the technical advantages will be able to be confirmed. The search of this control architecture was motivated by the implantation of the new family of vehicles named VW 23x. Among the advantages obtained with the adoption of the solution presented in this work is the structure of the CLP program in two main languages anticipated in the IEC 61131-3 norm: The FB (Futions Blocks) SFC (Structured Flow Chart). Considering the software architecture, it is original as it refers to the use of the SFC language for this type of application and brings advantages in the more accurate diagnosis of flaws when compared with other solutions. Another advantage presented in this architecture is unprecedented in the Volkswagen group and it refers to the integration between the net of discrets signals of controll devices and security devices.

Keywords: Automation, PLC, manufacturing cells, assembling, welding, body in white, automotive engineering.

Sumário

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO

A competitividade trouxe à indústria automobilística nacional uma crescente busca por produtividade, qualidade e flexibilidade elevada para satisfazer a uma demanda crescente do mercado com produtos heterogêneos e diversificados. Isso gerou investimentos em sistemas de produção automatizados de processos criando, inevitavelmente, complexidade das instalações, exigindo cada vez mais capacitação intelectual e operacional dos profissionais que planejam o controle e a automação da linha de produção.

Neste contexto há uma necessidade de sistemas de produção flexíveis e de caráter antropocêntrico e, ainda, com ferramentas de diagnóstico de fácil interação com os operadores das células produtivas. A redução dos custos dos investimentos em automação para viabilizar projetos que necessitam quase integralmente de importação de tecnologias, também tem sido um desafio para projetistas e engenheiros que tentam atender a essa necessidade.

A automação trouxe à indústria automotiva, as vantagens previstas por Castrucci e Moraes, (2001):

1. Repetibilidade e maior qualidade na produção;
2. Realização de tarefas impossíveis ou agressivas ao homem;
3. Rapidez de resposta ao atendimento da produção;
4. Redução dos custos de produção;
5. Restabelecimento mais rápido do sistema produtivo;
6. Redução da área de fabricação;
7. Possibilidade de introdução de sistemas produtivos interligados.

Porém, projetos de controle de células automáticas de produção de carrocerias demandam uma abordagem de controle baseado em sistemas de eventos discretos (SED) e de modelagem de controladores lógicos programáveis (CLP). Esta

necessidade dá-se principalmente pela característica seqüencial do processo de movimentação e acondicionamento de peças e da junção das partes das carrocerias.

A IEC 61131 vem tratando, ao longo dos anos, da normalização dos controladores programáveis com o objetivo de trazer aos diversos fabricantes de controladores, diretrizes para o desenvolvimento de produtos com plataformas abertas. A terceira parte desta norma (IEC 61131-3) merece notório destaque, pois, apresenta as diferentes características de cada linguagem. A importância do entendimento desta norma neste trabalho tem caráter didático para a compreensão da complexidade da programação de sistemas automáticos e a importância de investimentos na preparação de profissionais capacitados para a escolha da linguagem de programação mais adequada para a execução de projetos de arquitetura de softwares com qualidade.

Apesar da crescente evolução de outras arquiteturas de hardware para solução de sistemas de controle discreto, os controladores programáveis são as mais confiáveis, devido à robustez e estabilidade em ambientes industriais. O avanço tecnológico proporcionado pelos fabricantes de CLP trouxe a possibilidade de operar instalações complexas (com uma grande quantidade de entradas e saídas e de interfaces com outros sistemas) em um único controlador exigindo em sua programação uma arquitetura de fácil manutenção e possibilidade de alterações e otimizações do processo controlado.

Atualmente, os modelos utilizados para representar tais soluções (máquinas de estados hierárquicas, Redes de Petri, ou outras) diferem muito substancialmente das metodologias e linguagens de programação mais comuns dos CLP´s (diagramas de contactos, lista de instruções, etc.).

Estas, porém, estão estabelecidas em processos de modelagem razoavelmente limitados e, por isso, evitados no contexto do controle moderno de sistemas de eventos discretos.

A normalização do SFC (*Sequential Flow Chart*) prevista na IEC (*International Electrotechnical Committee*), como linguagem de modelagem de soluções de controle seqüencial é uma tentativa de facilitar esta tarefa. O SFC descreve graficamente o comportamento seqüencial de um programa de controle. O SFC estrutura a

organização interna do programa e ajuda a decompor o problema de controle em partes gerenciáveis, enquanto mantém a sua visão geral.

1.1 Objetivos

O que se deseja com esse trabalho é apresentar uma aplicação prática da arquitetura de automação composta por CLP´s e IHM e redes de controle . Esta arquitetura servirá como padrão em células automáticas de montagem de carrocerias automotivas desenvolvidas nos conceitos modernos de sistemas de produção, e utilizando ao máximo a disponibilidade dos equipamentos, através de um eficiente sistema de diagnóstico de falhas e interface amigável com o operador.

Outra principal vantagem da solução proposta é a criação de uma biblioteca de blocos de função (FB´s) e molduras (*Templates*) para servir de projeto nas futuras implantações de programação em novas células de montagem de carrocerias automotivas. Espera-se, com isso, ganho qualitativo no software final assim como ganho financeiro ao projeto.

Observando os problemas intrínsecos à modelagem e ao projeto de software para controle de sistemas de eventos discretos (SED), este trabalho ainda propõe o SFC (*Sequential Flow Chart*) e FB (Funtion Blocks) como as mais adequadas ferramentas de estruturação e organização interna do programa para a aplicação proposta.

1.2 Organização do texto

O capítulo 2 refere-se ao Processo de montagem de carrocerias automotivas. O capítulo 3 apresenta uma Introdução Teórica ao conceito de sistemas de eventos discretos. O capítulo 4 faz uma Introdução aos Sistemas de Manufatura e o capítulo 5, aos Sistemas de Manufatura Automatizados. Já o capítulo 6, aborda a Automação em Montagem de Carrocerias Automotivas Robotizadas. O capítulo 7 descreve A Arquitetura de Automação de Células de Montagem de Carrocerias Automotivas. O capítulo 8 apresenta a Norma IEC61131-3 Comentada, no capítulo 9, o Estudo de Caso e, finalmente, a Conclusão no capítulo 10.

2 PROCESSO DE MONTAGEM DE CARROCERIAS AUTOMOTIVAS

O processo de manufatura automotiva pode ser subdividido em estamparia (Press Shop), armação de carrocerias (Body Shop), pintura (Paint Shop) e montagem final (Final Assembly). A estamparia é momento em que são estampadas as peças unitárias. Na pintura encontram-se os processos de tratamento de superfície (fosfatização, vedação e pintura). Durante a montagem final são agregados todos os itens de acabamento final do produto (motor, bancos, vidros, rodas etc.).

Em um processo de armação ou montagem de uma carroceria automotiva, as peças unitárias metálicas são posicionadas em dispositivos e soldadas entre si formando subconjuntos (ex.: longarinas, painéis dianteiro e traseiro, reforços das laterais, painel interno das portas, etc.). Por sua vez, os subconjuntos são soldados formando conjuntos (ex.: assoalho, laterais, portas) e esses por sua vez formam a carroceria completa (Body in white), vide Fig 2.1. A junção ou "*joining*" Como: A ligação permanente ou uma colocação em contato de duas ou mais peças com uma determinada forma geométrica ou até mesmo de peças com material sem forma definida.

O termo "junção" abrange todos os processos aplicados à montagem de carrocerias e não se resume à soldagem. Esse termo agrupa com a solda outros processos, como por exemplo, o uso de adesivos, grafagem, clinching (solda a frio) etc.

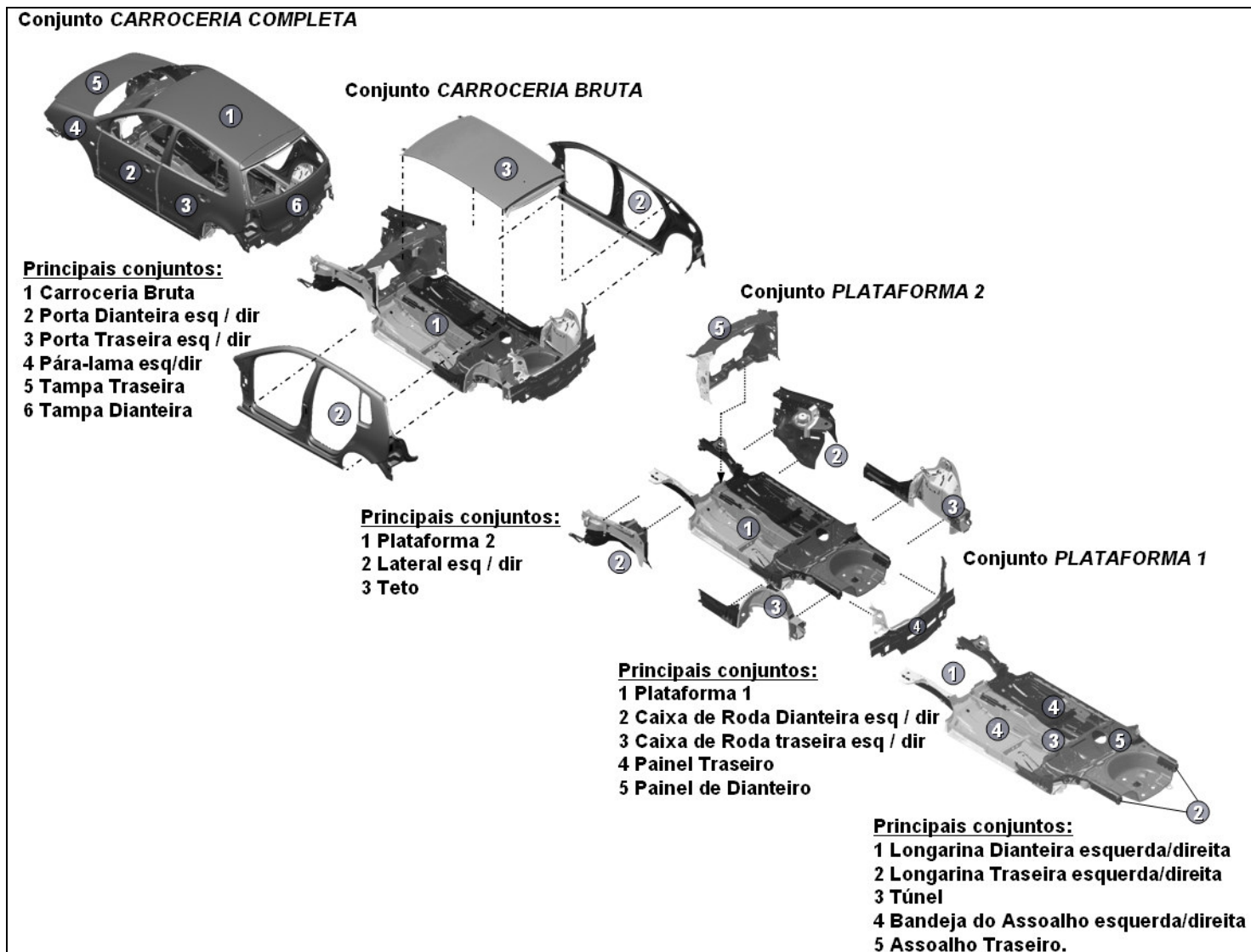



Figura 2.1. Seqüência de montagem dos subconjuntos para a formação de carroceria automotiva

2.1 Classificação dos Processos de Junção

Devido à complexidade de materiais de diferentes tipos e suas possíveis combinações, empregado nas peças a serem submetidas a processos de junção, torna-se interessante proceder a uma classificação preliminar destes processos. Na figura 2.2 tem-se a classificação das junções a partir dos processos de fabricação mecânica.

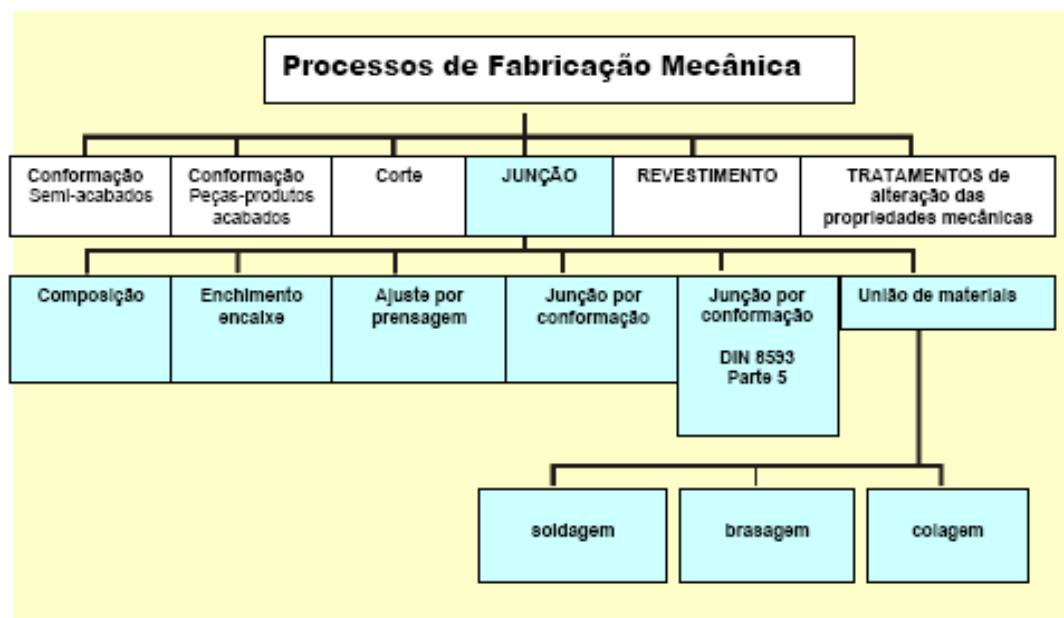



Figura 2.2 : Classificação dos processos de junção.

Atualmente a solda a ponto por resistência é a tecnologia de junção mais empregada na montagem da carroceria e, apesar da ampliação do uso de outras tecnologias, ainda é amplamente usada na indústria automobilística, em virtude da simplicidade, fácil controle e menor investimento, com um produto de qualidade e resistência satisfatórias.

A Figura 2.3 a-d apresenta as principais tecnologias atuais de junção.

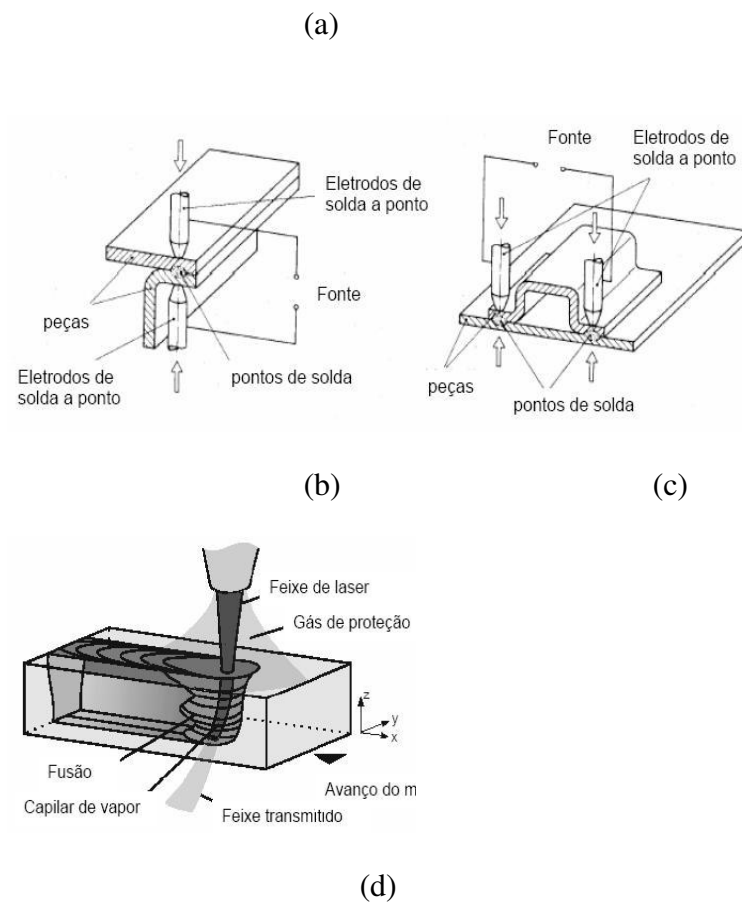



Figura 2.3 – Técnicas de junção de carrocerias automotivas (a) solda sob pressão por conformação; (b) solda sob pressão resistiva com acesso pelos dois lados; (c) solda sob pressão resistiva com acesso por apenas um dos lados e (d) solda a laser.

Considerando que uma carroceria atual de um automóvel possui cerca de 4500 pontos de solda, alguns metros de solda MIG/MAG e em alguns metros de cordões ou pontos LASER. A Figura 2.4 mostra as tendências no uso das diversas técnicas de junção de carrocerias no decorrer das últimas décadas. Pode ser visto uma diminuição da solda ponto por resistência e um aumento no uso de outras tecnologias como a junção por conformação (*clinching*) e solda LASER.

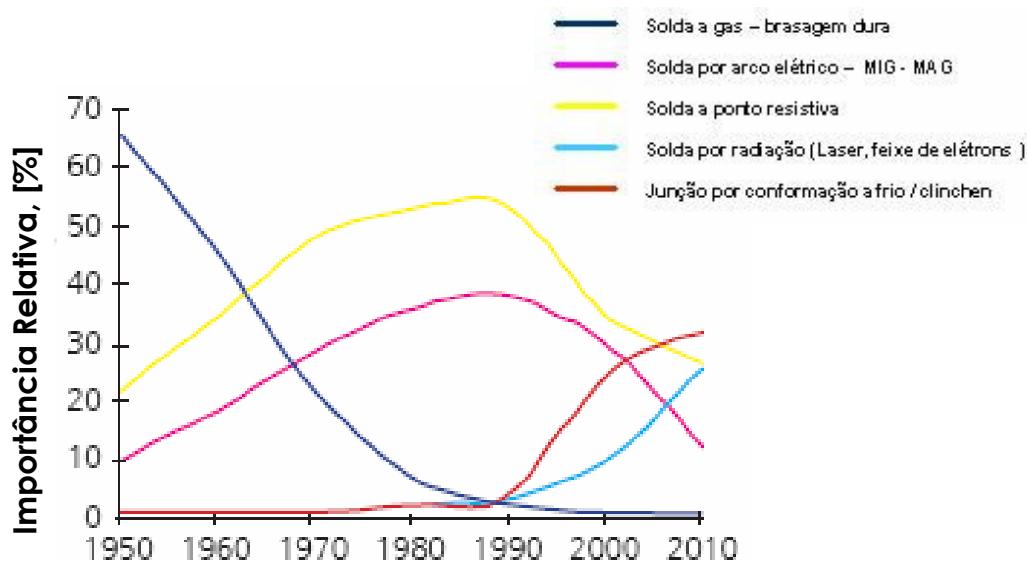



Figura 2.4 - Tendências nos processos de junção em carrocerias automotivas produzidas em série, sem considerar peculiaridades especiais de construção tais como tipo de carrocerias: estrutura monobloco em aço, "*space-frame*" em liga de alumínio ou peças com concepção multi-material (IWU, 2003).

Constata-se que o uso da solda a laser - Figura 2.3d - vem aumentando. Empresas já manufaturam produtos com cerca de 20 a 30 metros de solda por carroceria. A Figura 2.4 permite observar que a solda a laser também vem substituindo a solda MIG/MAG e por solda ponto resistiva (IWU, 2003).

Uma das vantagens da solda a laser é o fato dela não necessitar acesso pelos dois lados da peça, o que implica na diminuição do número de reforços da carroceria para obter a mesma resistência. Já que as peças não possuem aberturas ou furos para o acesso da máquina de solda, diminuindo-se o número de peças tem-se, então, a diminuição do peso da carroceria. A resistência e o modo de falhas de um ponto de solda são caracterizados como funções principalmente da espessura das chapas, resistência mecânica do metal, diâmetro do ponto aplicado e do modo de aplicação das cargas sobre esse ponto.

Observa-se que o uso da solda a laser - Figura 2.3d - vem aumentando. Empresas já manufaturam produtos com cerca de 20 a 30 metros de solda por carroceria. A figura 2.4 permite observar que a solda a laser também vem substituindo a solda MIG/MAG, e confirma algumas empresas considerando a solda a laser substituindo a solda a ponto resistiva, como uma evolução difícil de ser evitada (IWU, 2003).

Uma das vantagens da solda a laser é o fato dela não necessitar acesso pelos dois lados da peça, o que implica na diminuição do número de reforços da carroceria para uma mesma resistência, já que as peças não possuem aberturas ou furos para o acesso da máquina de solda; diminuindo-se o número de peças tem-se a diminuição do peso da carroceria. A resistência e o modo de falhas de um ponto de solda são caracterizados como funções principalmente da espessura das chapas, resistência mecânica do metal, diâmetro do ponto aplicado e do modo de aplicação das cargas sobre esse ponto.

2.2 Cenário dos Pilares Básicos Para o Projeto da Junta de Solda.

Em resumo um projeto de uma junta soldada pode ser definido como o estudo da montagem de dois ou mais componentes que são unidos por solda, segundo a RWMA (*The Resistance Welding Manufacturing Alliance* -1989). O objetivo básico do projeto é garantir que ela atenda os requisitos de funcionalidade, confiabilidade e segurança requeridas, e seja capaz de ser fabricada, inspecionada, transportada e posta em trabalho com os menores custos possíveis.

O cenário em que deve ser desenvolvido o projeto da junta soldada é mostrado na Figura 2.5. Deverão ser observados sempre os requisitos dos materiais do projeto da montagem e do processo de soldagem.

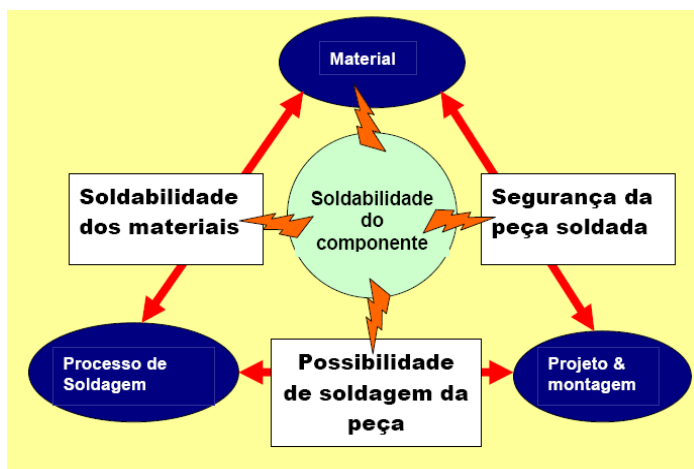



Figura 2.5: Cenário dos pilares base para o projeto da junta soldada (BATALHA, G., notas de aula).

Finalmente, projeto e processo devem ser feitos de modo que não sejam necessárias soluções de um alto custo variável para o veículo. Por isso deve sempre ser levado em consideração o custo e a vantagem competitiva proporcionada pela tecnologia no processo de junção. Na Figura 2.6 tem-se um comparativo do custo relacionado aos processos de conformação e junção na montagem de carrocerias automotivas.

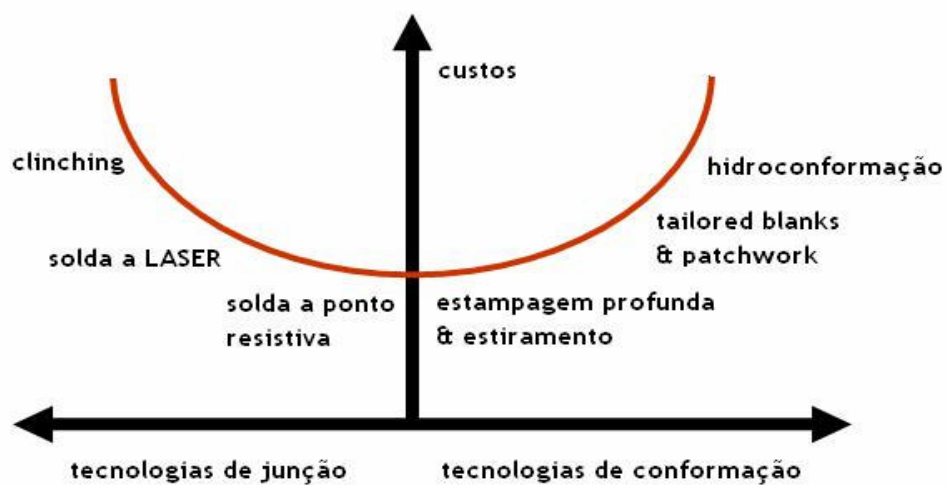



Figura 2.6-Curva representativa do custo vs. processos de conformação e junção na montagem de carrocerias automotivas (STANDRING, 2004).

2.3 Controle de dimensional e geometria no processo de montagem

2.3.1 Conceito RPS (Sistema de pontos de referência)

O Conceito RPS (*Reference Points System*), é descrito na Norma **VW 010 55**, tem por finalidade garantir que as referências dimensionais sejam idênticas em todas as fases do processo de desenvolvimento do produto e montagem. Através da restrição dos 6 graus de liberdade, que são as possibilidades de movimento de um corpo no espaço (3,2,1), tanto para o dimensionamento, quanto para a fabricação e controle de peças unitárias e conjuntos, melhorando assim a qualidade de nossos produtos.

Esse sistema é baseado no Sistema de Coordenadas Globais do veículo, descrito na Norma VW 010 52, cuja origem está localizada no centro do eixo dianteiro, definindo a posição de todos os pontos de todas as peças e componentes do veículo.

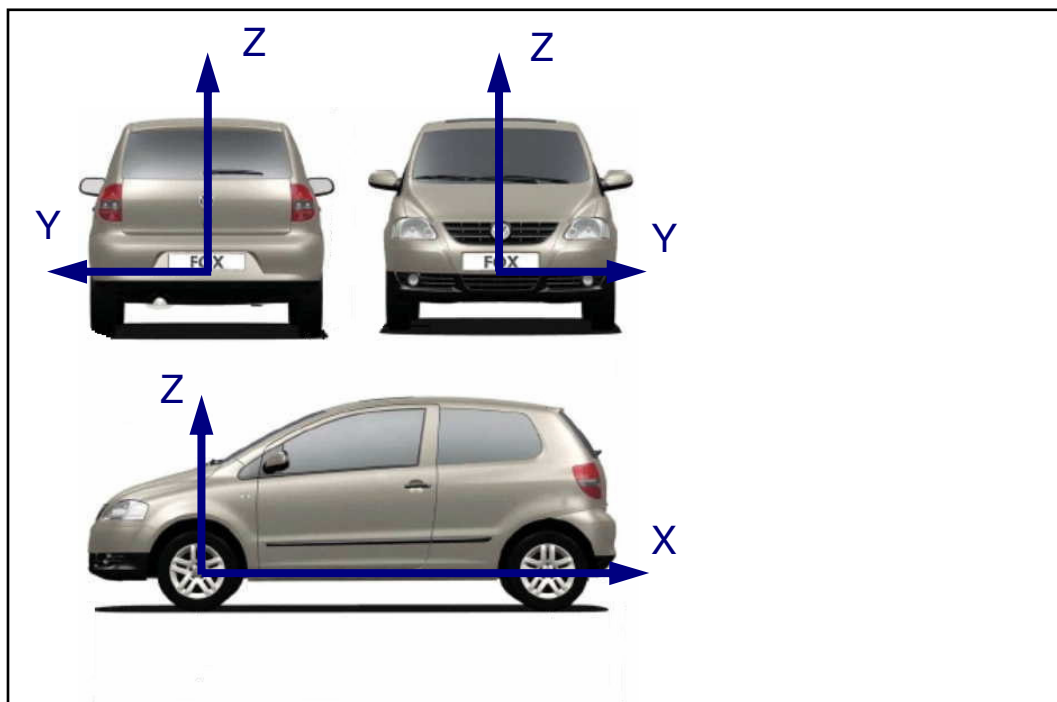



Figura 2.7-Sistema de coordenada global.

Os Pontos de Referência RPS são definidos por equipes de Engenharia Simultânea (SET - Simultaneous Enginnering Team), compostos por representantes das áreas envolvidas com a qualidade do produto (Engenharia do Produto, Engenharia de Manufatura, Qualidade Assegurada, Manufatura e sub-fornecedores).

A identificação dos pontos segue um padrão de denominação e representação no desenho, que permite que suas funções sejam identificadas facilmente para determinada peça:

- **Identificação do Ponto de Apoio:**

Indica qual o tipo de ponto de apoio do RPS como um apoio principal ou secundário, e quais os sentidos de fixação que ele assegura para a peça.

- **Tipos de Apoio Principal:**

São representados com letras maiúsculas e, normalmente, suas tolerâncias de posição são iguais a 0 (zero), o que quer dizer que são pontos de partida para o posicionamento espacial da peça:

H - Furo (*hole*);

F - Superfície (*face*);

T - Ponto Teórico;

- **Tipos de Apoio Secundário:**

São representados com letras minúsculas, e suas tolerâncias de posição apresentam valores próximos de 0 (zero), aproximadamente 0,2 mm. São aplicados em peças de grandes dimensões, e / ou que apresentam regiões flexíveis.

h - Furo (*hole*)

f - Superfície (*face*)

t - Ponto Teórico

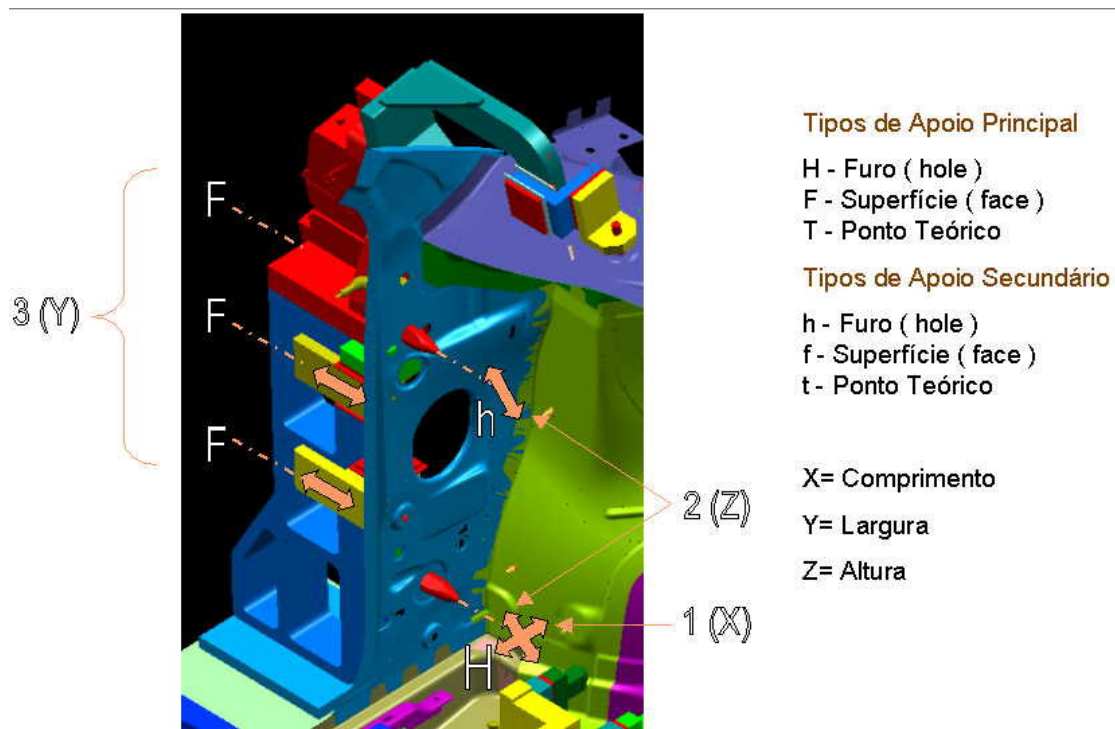



Figura 2.8: Exemplo de aplicação do sistema de coordenadas RPS.

3 INTRODUÇÃO TEÓRICA AO CONCEITO DE EVENTOS DISCRETOS

3.1 Conceitos gerais.

"Controle é um poder tecnológico incalculável para o aperfeiçoamento de inúmeros processos, seja em velocidade e precisão, seja em custo."

O controle é o uso deliberado de medidas das saídas do sistema a fim de melhorar o seu desempenho operacional, num esquema de realimentação ou feedback em torno do sistema original (CASTRUCCI e MORAES, 2001).

"Controle pode ser definido como uma ação planejada para que aquilo que se considera objeto de controle interaja com o processo, para, assim, atingir certos objetivos" (MIYAGI, 1996).

De fato, a idéia de sistema de controle é realizar a performance de uma particular função. Para que a tal função seja executada, o sistema necessita ser controlado selecionando a entrada correta para conseguir um comportamento desejado.

Desta forma, pode-se entender que a entrada de um sistema é visto, frequentemente, como um sinal de controle com o objetivo de obter um comportamento desejado (CASSANDRAS, 1993).

Conceitualmente, para um simples escalar, pode-se representar este "comportamento desejado" como um sinal de referência r (t), e a entrada de controle para um sistema real como:

$$u(t) = \gamma(r(t), t) \qquad (3.1)$$

Este relacionamento refere-se à lei de controle ou simplesmente controle. Para o sistema, o papel do controlador para uma certa função r(t) é selecionar $u(t) = \gamma(r(t), t)$ para ser a função de entrada.

Estendendo para o universo de vetores, em que múltiplas entradas são especificadas, têm-se:

$$u(t) = \gamma(r(t), t) \qquad (3.2)$$

Onde $\dot{\gamma}$ descreve a coluna vetorial onde as entradas são funções:

$$u_1(t) = \gamma_1\left(r(t), t\right), \ldots, u_n(t) = \gamma_n\left(r(t), t\right) \qquad (3.3)$$

Obtêm-se, então, o seguinte modelo:

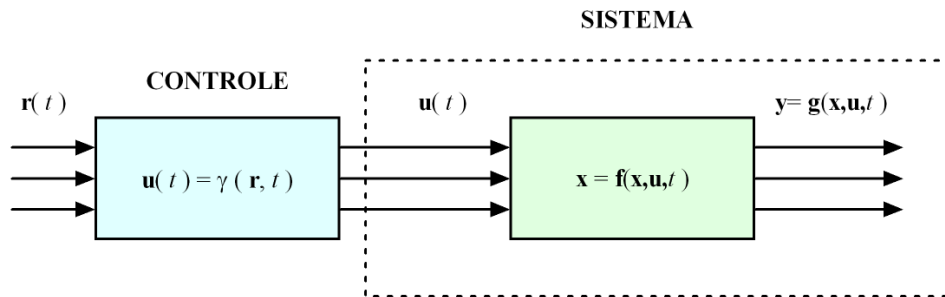



Figura 3.1. Modelagem de controle de entradas de um sistema.

3.1.1 Sistemas discretos no tempo.

Muito embora o tempo seja uma variável contínua, é possível desenvolver modelos baseados em equações diferenciais que são, particularmente, atrativos do ponto de vista matemático para se obter um modelo discreto no tempo. Caso sejam definidas em um sistema as variáveis de entradas e as de saída em intervalos de tempo apenas discretos, obtêm-se como resultante um sistema de tempo discreto, que, a partir desse ponto de vista, se diferencia de um sistema contínuo no tempo.

Há várias razões e vantagens na utilização deste tipo de modelo, das quais pode-se citar (CASSANDRAS, 1993):

1. Qualquer controlador moderno baseado em microprocessadores possui internamente um temporizador pulsante “*clock*” e, por sua vez, as variáveis são processadas apenas nesses instantes de tempo correspondentes aos pulsos do “*clock”*.

2. Várias equações diferenciais úteis para os modelos contínuos no tempo podem ser resolvidas apenas com a utilização de computadores digitais, que geram soluções que são atualmente versões discretas no tempo de funções contínuas no tempo.

3. Técnicas de controle digital, as quais são baseadas em modelo discretos no tempo, e que oferecem considerável flexibilidade, velocidade e baixo custo. Isso tudo devido aos avanços da eletrônica digital e da tecnologia computacional.

Nos modelos discretos no tempo, a linha do tempo é representada como uma seqüência de intervalos $t0 < t1 < ... < tk < ....$ Desta forma, supõe-se que qualquer intervalo possui o mesmo tamanho T, o qual, $t\,k + 1 - t\,k = T$ para qualquer $k = 0, 1,2, ...$ A constante *T* é muitas vezes definida como o intervalo de amostragem.
A variável real *t* é então substituída por uma variável inteira *k*, a qual é incrementada de um número de intervalos constantes a partir de um ponto de referência, normalmente $k = 0$.
A Figura 3.2 ilustra como um sinal contínuo no tempo x(*t*) pode ser “fragmentado” em intervalos discretos no tempo x(*k*), em um período de amostragem *T. É* importante notar que a discretização do tempo não implica na discretização do espaço de estado. Na Figura 3.2 observa-se que a trilha de amostragem do tempo discreto é constante em um determinado período, porém o estado (ou a amplitude) pode tomar qualquer valor em R(reais) assim como no caso contínuo no tempo.

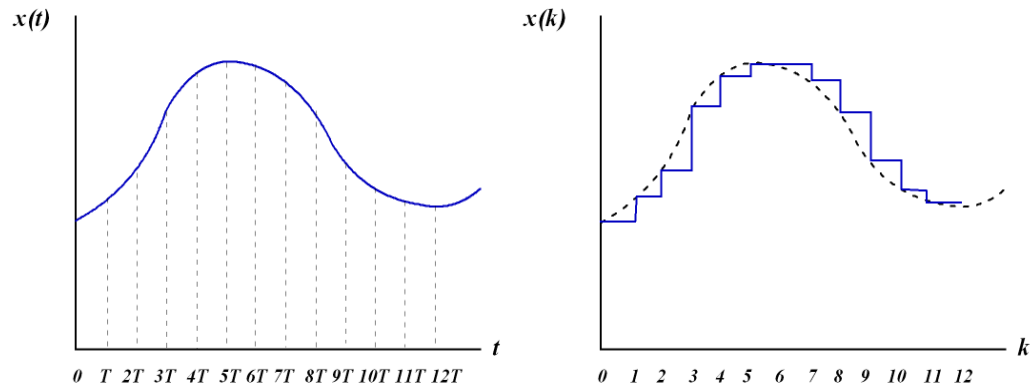



Figura 3.2. Contínuo no tempo e discreto no tempo (representado pela trilha de amostragem).

3.1.2 Sistemas de eventos discretos.

Quando o espaço do estado de um sistema é naturalmente descrito por um conjunto discreto com a transição dos estados são apenas observados em pontos discretos no tempo, pode-se então associar estas transições de estados como "eventos" e definir um SISTEMA DE EVENTOS DISCRETOS. (CASSANDRAS, 1993):

A partir deste ponto é possível começar o estudo deste tipo de sistema identificando suas principais características.

Desta forma pode-se definir evento como: "uma ocorrência instantânea causando transições de um valor de estado discreto para outro", pode-se exemplificar um evento como uma ação específica: o ligar de um botão. Ou como um resultado de várias condições, o robô finalizou sua tarefa, ou o fluído de um tanque atingiu seu limite máximo.

É definido então um evento como $\dot{e}$, quando é considerado um sistema afetado por diferentes tipos de eventos e um conjunto de eventos como $\dot{E}$.

Diferencia-se um sistema também pela forma como é acionado, seja ele pelo tempo ou por evento ou por eventos que pode-se diferenciá-los a seguir (CASSANDRAS, 1993):

Acionado pelo tempo: Neste sistema as transições são sincronizadas por um temporizador pulsante "clock": A cada pulso de tempo, um evento pode ou não ocorrer, e o seu estado muda. Assim, o processo se repete. O "clock" é isoladamente responsável por qualquer transição do estado de uma variável.

- Acionado por evento: Neste caso todo o evento $\dot{e}$,. define um processo distinto através do qual é determinado o instante de tempo da ocorrência.. As transições de estado são as resultantes de uma combinação de assíncronos e concorrentes processos de eventos. Além disso, esses eventos são necessariamente independentes uns dos outros.

3.1.3 Propriedades e características de um sistema de eventos discretos (SED).

A partir dessas classificações, pode-se definir as propriedades e características de um sistema de eventos discretos. Para isso, é oportuno diferenciá-lo de um sistema de variáveis dinâmicas e contínuas (SVDC).

Como foi mencionado, o maior trunfo da engenharia de controle até a data atual, são os modelos baseados em equações diferenciais.

Porém, para utilizar-se destes modelos, é necessário que o sistema satisfaça a duas propriedades (CASSANDRAS, 1993):

1) Contínuos no tempo.
2) O mecanismo de transição de estados acionado pelo tempo.

Em contraste um sistema dinâmico de eventos discretos, ou resumidamente sistemas de eventos discretos (SED), devem satisfazer as seguintes condições:

1) O espaço de estados é um conjunto discreto.
2) O mecanismo de transição de estados acionado por eventos.

Desta forma pode-se adotar a seguinte definição: Um sistema eventos discreto (SED) é um sistema de estados discretos e acionados por eventos, isto é, a evolução dos estados depende inteiramente de ocorrências de assíncronos eventos discretos ao longo do tempo.

Como observado na Figura 3.3, pode-se citar as duas principais característica que distingue um SED e um SVDC:

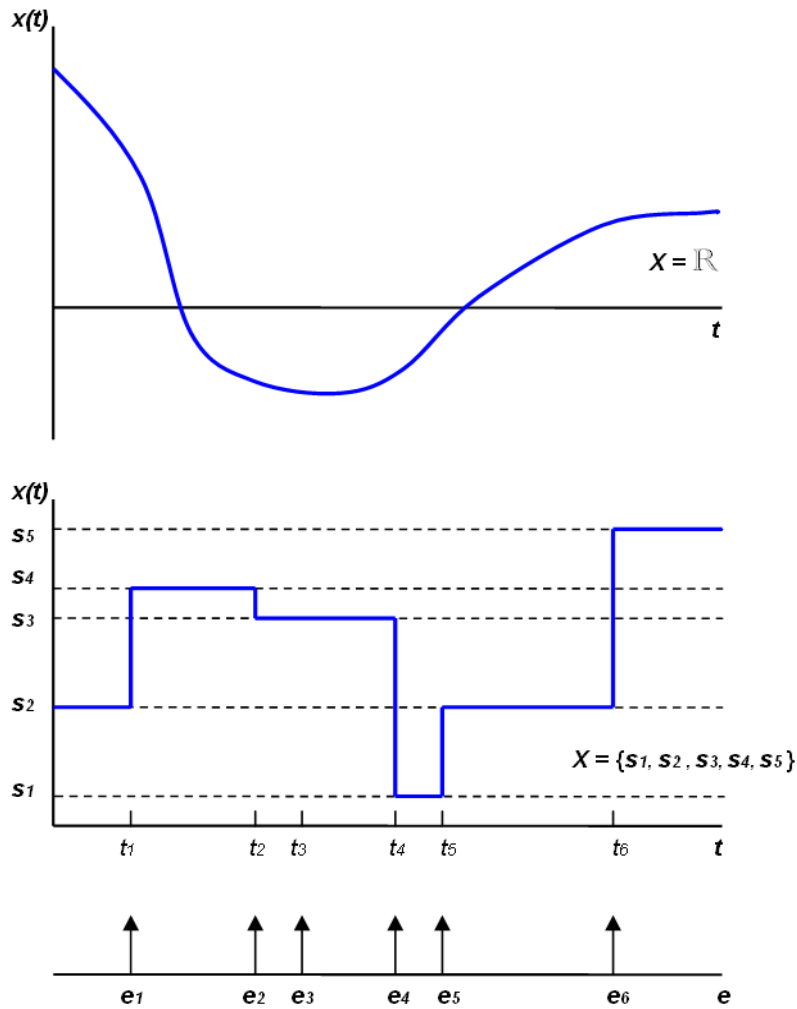



Fig. 3.3. uma comparação entre trilha de amostragem de um SVC e um SED.

- Para o SVDC apresentado, o espaço de estado *X* é um conjunto pertencente *a* R (reais), e *x(t)* é a solução da equação diferencial na forma genérica *x(t) = f(x(t), u(t), t),* onde *u(t)* representa a entrada.

- Para o SED, o espaço do estado é o conjunto S={s1, s2, s3, s4, s5}. A trilha de amostragem pode somente saltar de um estado para outro assim que um evento ocorre. Note que um evento pode ocorrer, porém não causa uma transição de estado, como no caso de e3. Desta forma não pode-se utilizar

nenhum mecanismo do tipo $x(t) = f(x(t), u(t), t)$, que possa especificar quais eventos irão interagir ao longo do tempo e como essas ocorrências podem ser determinadas (Cassandras, 1993).

3.2 Resumo da classificação dos sistemas de controle.

Para um melhor entendimento da classificação dos sistemas de controle e, principalmente, para posicionar os sistemas de eventos discretos, é apresentado o seguinte resumo (CASSANDRAS, 1993):

- **Sistemas estáticos e dinâmicos**: Em sistemas estáticos a saída é sempre independente de valores passados da entrada. Em sistemas dinâmicos a saída depende do passado dos valores da entrada. O comportamento de sistemas dinâmicos pode ser descrito por equações diferenciais..

- **Sistemas variáveis e invariáveis no tempo:** O comportamento de sistemas invariáveis no tempo significa que ao aplicar uma entrada específica a um sistema é sempre esperado que responda da mesma maneira.

- **Sistemas lineares e não-lineares:** Um sistema linear satisfaz a condição $\mathbf{g}(a1\ \mathbf{u}1 + a2\ \mathbf{u}2) = a1\ \mathbf{g}(\mathbf{u}1) + a2\ \mathbf{g}(\mathbf{u}2)$, onde o $\mathbf{u}1$ *e* $\mathbf{u}2$ são dois vetores de entrada, a1 e a2, são dois números reais, e $\dot{\mathbf{g}}$ é a saída resultante. Os sistemas lineares dinâmicos invariáveis no tempo têm sido estudados detalhadamente na literatura da teoria de sistemas e controle.
- **Sistemas de estado contínuo e de estado discreto:** Os sistemas de estado contínuo, as variáveis do estado podem admitir, geralmente, qualquer valor real (ou complexo). Em sistemas de estado discreto as variáveis do estado são elementos de um conjunto discreto (por exemplo, os inteiros não negativos).

- **Sistemas acionados pelo tempo e acionados por eventos:** Em sistemas acionados pelo tempo o estado muda continuamente enquanto o tempo muda. Em sistemas acionados por evento, apenas a ocorrência de eventos discretos gerados de forma assíncrona conduz a transições instantâneas de estado, entre as ocorrências dos eventos o estado permanece não afetado.

- **Sistemas determinísticos e estocásticos.** Um sistema torna-se estocástico sempre que uma ou mais de suas variáveis de saída é uma variável aleatória. Neste caso, o estado do sistema transforma-se um processo estocástico, e uma estrutura probabilística é requerida para descrever o comportamento do sistema.

- **Sistemas discretos no tempo e contínuos no tempo.** Um sistema é dito contínuo no tempo quando todas as entradas, estado, e as variáveis de saída são definidas para todos os valores possíveis do tempo. Em um sistema discreto no tempo, uma ou mais destas variáveis estão definidas em pontos discretos no tempo, geralmente como o resultado de um processo de amostragem.

Na Figura 3.4, pode-se apresentar como o foco de nosso estudo os SISTEMAS DE EVENTOS DISCRETOS (SED) na árvore de classificação dos sistemas de controle.

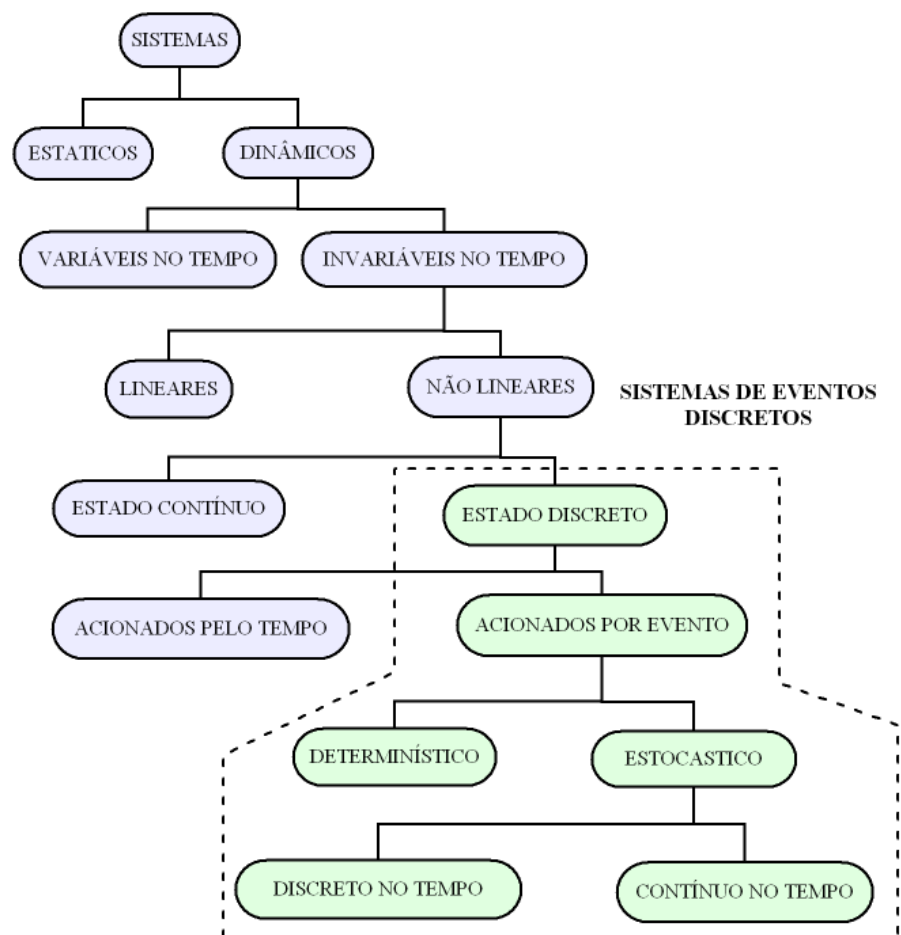



Fig. 3.4. Árvore de classificação de sistemas (CASSANDRAS, 1993):

3.3 Conceito de controle automático para Sistemas de variáveis contínuas (SVC) e eventos discretos (SED).

Investimentos em novas tecnologias, equipamentos, máquinas e sistemas de controle têm sido os realizados para atender a tais exigências, sendo que um meio bastante efetivo para isso é a introdução da automatização.

A base tecnológica para realizar a automação é o controle automático, que pode ser dividido em duas grandes classes (MIYAGI, 1996).:

De acordo com SANTOS FILHO [1993], em sistemas produtivos há um complexo conjunto de informações qualitativas e quantitativas[1]. A nível de controle interno das máquinas, dispositivos e processos, envolvendo somente variáveis contínuas, realiza-se o controle quantitativo.

- **Controle quantitativo:** Onde, o conteúdo dos comandos de controle possui uma quantidade infinita de informações, isto é, informações analógicas e/ou informações contínuas.
- **Controle qualitativo:** Número finito (muitas vezes binário) de informações, isto é informações discretas e/ou informações digitais.

O controle de SVC é uma das técnicas mais efetivas para a implementação do controle quantitativo. Esta técnica é utilizada para controlar sistemas que possam ser governados através de valores mensuráveis como a velocidade de rotação de um servomecanismo ou o volume de líquido em um tanque. No controle de SVC o valor real (atual) da variável é constantemente comparado ao valor de referência, isso para que a variável física (velocidade, torque, temperatura, força, posição, campo eletromagnético, etc.) mantenha ou atinja o valor desejado.

---

[1] *As informações quantitativas referem-se ao estado de variáveis contínuas que modelam o comportamento dinâmico de SVCs. As informações qualitativas referem-se aos estados discretos que modelam o comportamento dinâmico de SEDs.*

A teoria de controle de SVC é bem sistematizada e muito aplicada, pois muitos objetos de controle podem ser considerados de natureza contínua e linear ou podem ser linearizadas. No controle de SVC vários conceitos e teorias foram desenvolvidos e validados, como por exemplo:

A função de transferência de objeto de controle com uma entrada e uma saída assim como a equação dos espaços de estados que fornece a base teórica para o tratamento indistinto de sistemas com uma variável ou muitas variáveis; etc. (MIYAGI, 1996).

Por outro lado, no caso do controle qualitativo, a técnica mais representativa de sua implementação é o controle de SED. Nesta técnica, considera-se que os vários elementos (estruturais) que compõem o objeto de controle podem assumir um número infinito de estados (MIYAGI, 1996). Por exemplo: ligar/desligar o motor da bomba, abrir/fechar a válvula de ar, avançar/recuar o carro, subir/descer o braço, acionar/cortar a alimentação, etc. É o controle de variáveis descontínuas no tempo e no espaço (e que normalmente considera-se que assumam valores discretos).

Os vários elementos como o motor da bomba, válvula do tanque, volume do líquido, etc, que compõe o objeto de controle e os seus respectivos estados finitos (ligado/desligado, aberto/fechado, máximo/intermediário/mínimo), podem ser todos representados por um conjunto limitado de estados.

O conjunto válido dos estados dos vários elementos estruturais do objeto de controle é chamado de passo “step” do processo de controle.

Portanto, neste caso, abstrair e modelar o objeto de controle significa, definir como os estados dos elementos estruturais do objeto de controle devem evoluir em função das entradas de atuação e como combinar os estados destes elementos para resultar nos passos desejados como saída.

Na tabela 3.1 abaixo, observa-se um quadro comparativo das duas principais classes de controle automático.

Tabela 3.1: Controle automático SED e SVC.

Controle SVC	• Em geral, o objeto de controle trabalha com variáveis contínuas, isto é, manipula informações contínuas; • Efetivo para o controle de variáveis físicas como os fluídos na indústria de processos; • Envolve conceitos de controle com realimentação negativa de controle de malha fechada; • Pode ser considerado um tipo de controle quantitativo; • A estrutura de controle é geralmente em malha fechada.
Controle SED	• Em geral, o objeto de controle trabalha com estados e eventos discretos, isto é, manipula informações discretas; • Imprescindível para o controle de processos que ocorrem, por exemplo, na indústria mecânica; • Envolve o controle qualitativo e o processamento do comando de controle; • A estrutura de controle não é necessariamente em malha fechada.

O Conceito de Sistemas de variáveis contínuas (SVC) e variáveis discretas (SED) tem sua importância no papel de controle industrial. Porém, apesar da grande experiência acumulada nas aplicações práticas, a sistematização e a base teórica de SED ainda são muito incipientes quando comparadas com SVC.

Satisfazer certos objetivos, no caso do controle SVC, geralmente corresponde a igualar o valor de certa variável física (variável de controle) a um valor de referência. No caso de controle SED, corresponde à execução de operações, segundo um procedimento pré-estabelecido.

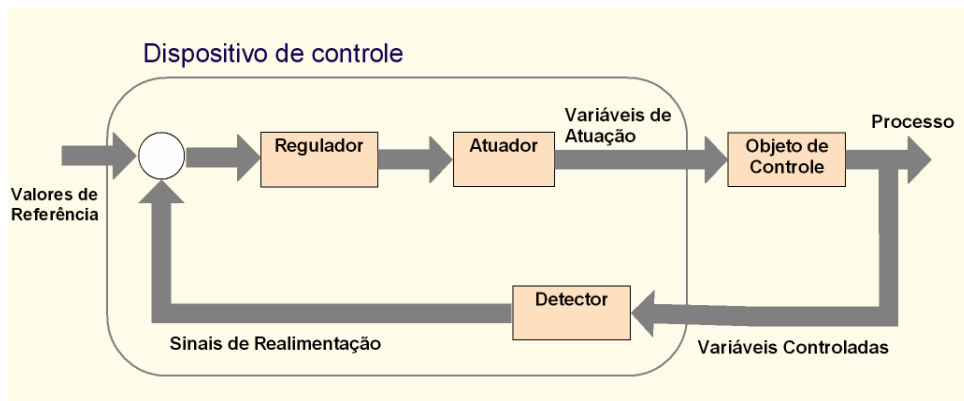
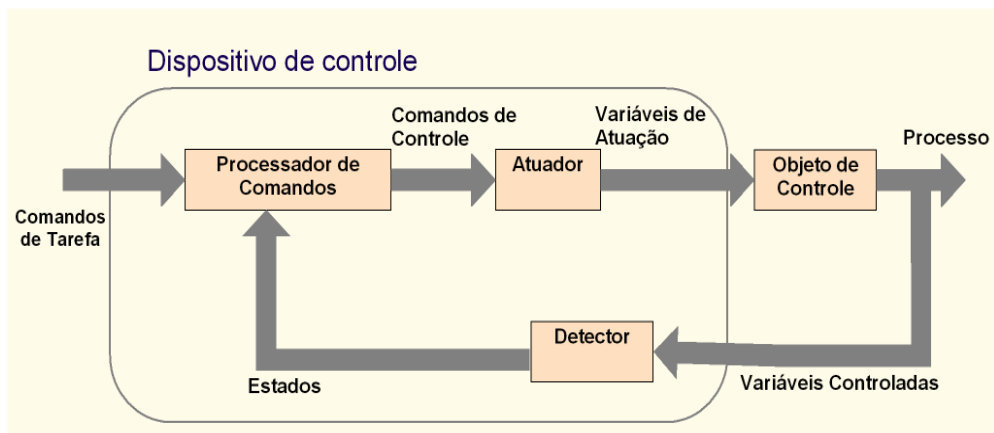
Simplifica-se então os dois modelos de sistemas de controle nos diagramas apresentados nas Figuras 3.5 a e b.

(a) Sistemas de Controle SVC.

(b) Sistemas de Controle SED.

Figura 3.5 - Diagrama conceitual básico dos sistemas de controle de SVC e SED

Neste trabalho, devido à natureza do processo de controle de células automática, abordaremos os SED devido à necessidade da interação e sincronismos dos diversos elementos e tarefas presentes no processo de montagem.. Muito embora a abordagem SVC será sempre solicitada quando for necessário um estudo focado nas aplicações do processo de soldagem por exemplo.

4 INTRODUÇÂO AOS SISTEMAS DE MANUFATURA

Similarmente à classificação dos sistemas de controle SVC e SED, pode-se também realizar uma classificação de sistemas de manufatura como:

Sistemas de Produção Discreta: Quando os produtos finais são compostos de partes discretas, isto é, quando podem ser quantificados numa forma discreta por um número real, como automóveis peças unitárias de carrocerias, motores. Como exemplo, pode-se citar o processo de manufatura de automóveis.

Sistemas de Produção Contínua: Quando o produto final não pode ser identificado individualmente, isto é, quando ele é contado em parcelas fracionárias, como litros, toneladas, metros. Como é o caso das indústrias de processos em geral: líquidos, laminados, refinarias.

Em células de montagem de carrocerias pode-se, então, classificar como um **sistema de produção** discreta ou simplesmente como **sistemas de manufatura** que por definição são compostos por:

a) **Um sistema físico;**
b) **O layout de manufatura,** que representa a forma como os recursos físicos são distribuídos no chão de fábrica e a conexão entre eles;
c) **Sistema de gerenciamento,** também conhecido como sistema de controle ou sistema de tomada de decisão.

(DiCESARE, 1993).

Faz parte do sistema físico o conjunto de recursos que opera sobre a matéria-prima e/ou sobre o trabalho em processo, como máquinas, robôs, células, sistemas de transporte (transportadores, AGV's), operadores, dispositivos de armazenagem, estações de carga/descarga, estações de controle de qualidade.

Por outro lado, o sistema de gerenciamento é aquele que se utiliza do sistema físico para executar o trabalho de forma a otimizar alguns critérios como produtividade (que deve ser maximizada), níveis de trabalho em processo (os quais têm que ser minimizados), tempo de espera (que devem ser reduzidos a zero, se possível).

Sistema de manufatura (ou sistema de produção discreta) é definido por MOREIRA (1993) como um conjunto de atividades e operações necessárias para a produção de produtos envolvendo os seguintes elementos: insumos, o processo de transformação e os produtos fabricados.

Uma diferença marcante de todo sistema de produção discreta em relação aos sistemas de produção contínua é a identificação de gargalos, que são pontos no processo produtivo onde são gerados estoques que excedem a produção local.

Devido à flexibilidade, ao alto volume de produção e ao controle de qualidade exigida atualmente nos sistemas produtivos, o comportamento desses sistemas é considerado de alta complexidade, já que desenvolvem uma série de atividades que são realizadas em forma simultânea e concorrente. Além disso, deve-se considerar em relação ao produto final: a sua complexidade, sua diversidade, variação na quantidade a ser produzida em função da demanda e introdução de novos produtos aos meios existentes.

Assim, a complexidade inerente será tanto maior quanto mais complexos forem os produtos a serem fabricados, quanto mais complexa for a estrutura de produção vinculada a esses produtos e quanto mais limitadas forem as liberdades de custos e prazos para a realização da manufatura (PORTO, 1990).

Em resumo, pode-se dizer que o objetivo dos sistemas de manufatura é agregar partes para compor diversos produtos, os quais precisam seguir uma determinada seqüência de operações (roteiro de produção), sendo que cada operação pode ser realizada por uma ou mais máquinas. A forma como serão resolvidos os problemas referentes ao planejamento e programação da produção irá determinar a eficiência do sistema de manufatura como um todo. E em ambientes flexíveis de produção, como é o caso dos sistemas *job shop* em geral, objeto do presente trabalho.

4.1 Classificação dos Sistemas de Produção

Existem várias formas de classificar os sistemas produtivos (MOREIRA, 1993; PAPADOPOULOS, 1993; TUBINO, 1997).

Dependendo da natureza intrínseca do material a ser transformado e a dinâmica do fluxo do produto através da fábrica (por tipo de operações), os sistemas de produção podem ser classificados em: sistemas discretos e contínuos.

Sistemas discretos de produção ou sistemas de manufatura, objeto deste trabalho, são sistemas que podem ser classificados:

a) Pelo tipo do processo de transformação;
b) Pelo volume de produção.

No primeiro caso, dois tipos de processos de transformação são identificados:

a) Processos de montagem (*assembly*), onde o produto final é formado a partir de diversos componentes (montagem de carrocerias automotivas);
b) Processo de transformação propriamente dito (*non-assembly*), onde o produto final é resultado de um ou de vários processos de transformação que sofre a matéria prima como por exemplo a fresagem, e o torneamento de peças.

O segundo tipo de classificação é o mais conhecido e divulgado na literatura.

Dentro desta classificação existem três categorias, que são mostradas na figura 4.1.

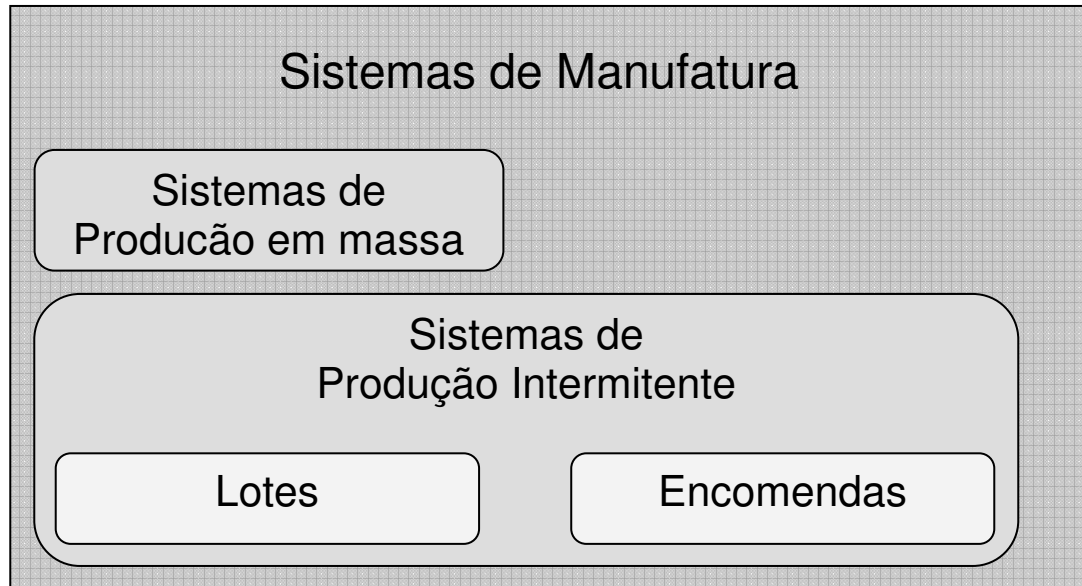



Figura 4.1 Classificação de um sistema de produção discreto pelo volume de produção.

4.1.1 Sistemas de Produção em Massa

Sistemas de produção em massa são utilizados geralmente para produzir itens altamente padronizados com demanda estável. Neste tipo de sistemas, geralmente, os produtos fluem de um posto de trabalho para outro numa seqüência prevista (gerada pelo mesmo roteiro de fabricação para todos os produtos), sendo que as operações realizadas nos postos de trabalho são sempre repetitivas.

Em geral, linhas de montagem são exemplos típicos deste tipo de sistema, como a manufatura de automóveis e eletrodomésticos. Além das características mostradas na figura 4.2, pode-se citar ainda:

a) Obtenção de altos índices de produção devido à produção em grande escala;
b) Os produtos diferem apenas em termos de montagem final;
c) Baixos custos de produção devido a economias de escala;
d) Baixos tempos de processamento improdutivo;
e) Sistemas balanceados;
f) Grau de diferenciação relativamente pequeno (produção de poucos modelos);

g) Sistemas altamente eficientes e pouco ou nada flexíveis;
h) O equipamento é geralmente dedicado à manufatura de um único tipo de produto.

Este tipo de sistema é utilizado, geralmente, por empresas que procuram alta eficiência e ganhos por economias de escala para se manterem competitivos no mercado. Sistemas de produção em massa costumam ser divididos em linhas de transferência e linhas de produção (ver figura 4.2).

a) **Linhas de transferência** são sistemas altamente automatizados e inflexíveis (o que limita o número de produtos a serem fabricados), onde a transferência dos produtos de uma estação de trabalho para outra é realizada em forma síncrona, isto é, em forma simultânea. Neste tipo de sistema, os tempos das operações são determinísticos, as estações de trabalho são totalmente automatizadas e o sistema é rigorosamente balanceado.

b) **Linhas de produção** são sistemas onde a transferência dos produtos de uma estação de trabalho para outra é feita de forma assíncrona, isto é, dentro da linha de produção os produtos se movimentam independentemente um do outro. Este fato permite incorporar estações de trabalho operadas manualmente com variações no ciclo produtivo. Portanto, as linhas de produção não precisam ser totalmente balanceadas.

4.1.2 Sistemas de Produção em Lotes

O que diferencia este tipo de sistema da produção em massa é a sua flexibilidade, ou seja, a capacidade de produzir um grande número de produtos de volume médio do mesmo item ou produto (fabricação intermitente de produtos em quantidades fixas ou lotes). Os lotes de produção podem ser produzidos apenas uma vez, ou a intervalos regulares de tempo.

Neste tipo de sistemas, o produto flui de forma irregular de um centro de trabalho para outro sendo os equipamentos utilizados para este tipo de produção de propósito geral, mas projetados para trabalhar com altos índices de produção. Estes tipos de equipamentos permitem grande facilidade para realizar mudanças tanto no produto como no volume de produção, o que se reflete numa perda de eficiência se comparado com os sistemas de produção em massa.

Assim, este tipo de sistemas apresenta maior flexibilidade diante da produção em massa, mas perde no volume de produção. Conforme mostra a Figura 4.2, dois tipos de sistemas podem ser considerados como pertencentes à produção em lotes:

Sistemas Flexíveis de Manufatura (*FMS*);
Sistemas de Montagem Flexíveis (*FAS*).

Conforme mostra a Figura 4.2. Sistemas de Montagem Flexíveis (DONATH and GRAVES, 1989) são sistemas que consistem de um conjunto de produtos cada qual com um volume especifico de montagem e um número fixo de células.

FAS são caracterizados principalmente por possuírem linhas de montagem não balanceadas ou assíncronas, isto implica no fato do índice de produção não ser fixo (os tempos de processamento das operações variam de uma estação para outra) ou o índice de produção é fixo, mas não necessariamente o mesmo índice para todas as estações de trabalho (CHETTY and GNANASEKARAN, 1996).

Nos FAS, as estações de trabalho são separadas uma da outra e trabalham a índices diferentes daquelas de uma linha de montagem convencional. O fato das estações de trabalho ficarem separadas faz com que as tarefas (*jobs*) permaneçam nas estações até que o trabalho seja totalmente completado. Nos FAS, os tempos de processamento diferem de uma estação para outra, o que pode resultar em variações aleatórias nos índices de trabalho, performance das máquinas. Uma outra característica importante dos FAS é a sua flexibilidade de operação, isto é, os trabalhos podem ser direcionados

para qualquer célula de trabalho capaz de realizar uma mesma operação, e, em casos de reparos ou quebras nas máquinas, os trabalhos podem ser redirecionados.

4.1.3 Sistemas de Produção por Encomenda (*Jobbing Shop*)

A principal característica deste tipo de sistema é o baixo volume de produção, isto é, os tamanhos dos lotes de manufatura são pequenos, frequentemente um de cada tipo. Este tipo de produção é conhecido também como produção individual (MOREIRA, 1993) e é comumente usado para atender uma necessidade específica dos clientes. Devido ao grande número de tarefas realizadas neste tipo de sistema, os equipamentos utilizados na produção devem ser flexíveis para atender aos diversos pedidos dos clientes. A produção de aeronaves, veículos espaciais, máquinas, ferramentas e equipamentos especiais, protótipos de produtos, são alguns exemplos de **Sistemas de Produção por Encomenda**.
Fabricações sob encomenda ou lotes reduzidos, tais como produção de séries especiais e/ou limitadas, apesar de serem produzidos em poucas unidades e envolver a transformação de matéria-prima em produtos acabados, não podem ser identificados como *jobbing shop*, pelo fato de não serem produzidos dentro de uma linha de produção (GROOVER, 1987).

Estes tipos de produção realizados em lugares específicos (fora da fábrica) são conhecidos na literatura como sistemas de produção por projeto (TUBINO, 1997), ou grandes projetos sem repetição (MOREIRA, 1993). A figura 4.2, resume o perfil da evolução dos sistemas de produção ao longo do tempo.

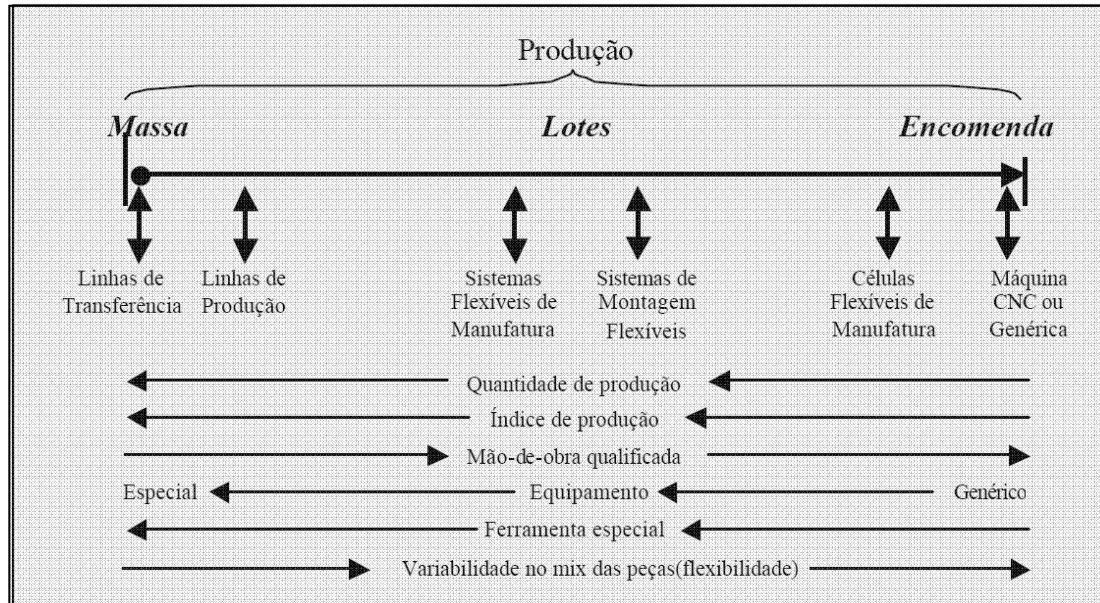



Figura 4.2.- Evolução dos Sistemas de Produção ao longo do tempo

4.1.4 Sistemas Flexíveis de Manufatura.

Os conceitos de FMS manufatura (SFM ou FMS, do inglês Flexible Manufacturing System) devem ser sempre considerados para direcionar os projetos de automatização da manufatura automotiva.

Os FMS's representam o mais alto grau de automação das células de manufatura.

A presença dos computadores e os meios eficazes de comunicação (como rede) e sua constante evolução nas últimas décadas, proporcionaram a implantação deste conceito nos projetos de automação da manufatura.

A tecnologia da informação é responsável pelo controle dos equipamentos de produção, utilizando-se de bancos de dados que são especialmente implementados com dados de manufatura, aliados a sistemas de informações para o planejamento, seqüenciamento e coordenação das operações de forma integrada.

Desta forma pode-se definir, um FMS como uma combinação de equipamentos, sistemas de controle e de comunicação integrados na manufatura, para um

desempenho de alta produtividade, com capacidade de respostas de modo rápido e econômico a mudanças no ambiente operacional.

Uma das definições mais citadas sobre FMS é: "um sistema que trata o processamento de dados distribuídos de alto nível e o fluxo automatizado de material utilizando máquinas controladas por computador, células de montagem, robôs industriais e máquinas da inspeção."
Segundo Rembold (1994), um sistema flexível de manufatura é formado por máquinas com comando numérico computadorizado e são interconectadas para transferência de informações (por um sistema de rede de comunicações) e de materiais (por um sistema de manipulação, troca e, transporte de peças e ferramentas como: esteiras, veículos transportadores). Um FMS se distingue de outras formas de manufatura automatizada por considerar:

- A diversidade de produtos que se deseja produzir (flexibilidade do produto);
- As características adaptativas das máquinas (flexibilidade dos equipamentos);
- E as propriedades de similaridade dos processos (flexibilidade do processo).

Sistemas flexíveis de representam o âmago da automação fabril no chão de fábrica, e foram desenvolvidos especialmente para manufaturar produtos em quantidades de volume médio (produção em lotes ou *batch manufacturing*), oferecendo muito da eficiência das linhas de alto volume de produção (produção em massa ou m*ass manufacturing*) enquanto mantêm muito da flexibilidade achada no tradicional sistema de produção por encomenda (produção *jobbing shop*) ou de baixo volume de produção.

Sistemas Flexíveis de Manufatura, por outro lado, são exemplos típicos de sistema concorrente assíncrono que tem a capacidade de produzir simultaneamente diversos s produtos (ou partes deles) usando vários recursos. Para isso, os FMS utilizam um

conjunto de estações de trabalho flexíveis (geralmente maquinas CNC e robôs) interconectadas por meio de um sistema de armazenagem e transporte automático controlado por um sistema de computador integrado e um sistema de tomada de decisão (programador), para decidir a cada momento (quando) o que deve ser feito (o que) e sobre que máquina (onde).

A flexibilidade dada a este tipo de sistema permite-lhe ter a capacidade de escolher entre vários recursos para realizar uma determinada operação, assim como escolher o roteiro que irá seguir o produto, além de um significativo aumento na produtividade. Para conseguir estas vantagens que oferece um FMS, o programador organiza a produção, os programas, e sincroniza a utilização das máquinas para permitir a introdução de novos produtos, evitando assim possíveis paradas ou quebras de máquinas com o objetivo de aumentar ao máximo a utilização das máquinas.

Dentre as muitas vantagens que apresentam os FMS tem-se (GROOVER, 1987):

- Aumenta o nível de utilização dos equipamentos;
- Melhora o nível de qualidade dos produtos;
- Reduz o custo de produção;
- Reduz o inventário de trabalho (produtos) em processo;
- Reduz o *lead time* de manufatura;
- Reduz os tempos de *setup*;
- Permite controlar e rastrear produtos ao longo da produção.

Problemas concernentes a FMS's podem ser divididos em dois tipos: os que são referentes ao projeto e aqueles relacionados à parte operacional. Os referentes ao projeto estão mais relacionados com a otimização dos componentes do FMS e suas interconexões (KUSIAK, 1985).

a) Seleção de família de peças;
b) Seleção de paletes e acessórios (*fixtures*);
c) Seleção dos sistemas de manuseio de material;
d) Seleção do sistema de informação que liga os vários módulos do FMS com o resto dos módulos da fábrica automatizada;
e) Layout do FMS.

Aqueles referentes à parte operacional estão mais relacionados com a utilização do FMS e incluem (SURI and WHITNWY, 1984):

a) tamanho dos lotes;
b) balanceamento da carga de trabalho;
c) planejamento de longo e médio prazo;
d) programação e execução;
e) gerenciamento das ferramentas;
f) respostas a mudanças na demanda;
g) reação a quebra/ruptura de recursos.

Considerando que os FMSs utilizam para o seu funcionamento uma série de recursos relacionados entre si (que requerem um alto investimento), as decisões envolvidas nas etapas de projeto e operação são consideradas complexas. Portanto, é importante planejar, projetar e operar um FMS tão eficientemente quanto possível. Sendo assim, faz-se necessário selecionar alguns métodos que permitam a modelagem e análise de tais sistemas e que tenham capacidade de suportar a seleção de bons projetos e políticas operacionais.
Devido à grande flexibilidade que apresentam os FMS's que lhes permite escolher entre diversos recursos (máquinas multifuncionais, robôs), assim como diversos roteiros a serem seguidos para a fabricação de produtos (permitindo assim um aumento na produtividade). Estes sistemas impõem um problema desafiador, que se traduz na correta alocação dos recursos aos diversos processos requeridos para

produzir uma gama de produtos, assim como a programação da seqüência das atividades para se obter o melhor desempenho do sistema.

Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS) podem ser considerados, em muitos casos, como ***job shop*** **automatizados** (SABUNCUOGLU, 1992).

As principais diferenças são:

a) Em um FMS as funções da maioria dos trabalhadores são automatizadas e

b) um FMS possui um sistema de manuseio de material automatizado (freqüentemente veículo guiado automaticamente, robôs e transportadores) que interliga as diversas estações de trabalho dentro do FMS.

Como os FMSs são sistemas dinâmicos discretos, eles podem ser modelados e analisados por uma série de ferramentas tais como Filas de Espera, Cadeias de Markov, Programação Matemática, enquanto que a simulação é freqüentemente utilizada para avaliar o desempenho do sistema.

Na fase operacional dos FMSs, um dos maiores problemas está relacionado com o planejamento e programação da produção.

4.1.5 Flexibilidade nos Sistemas de Manufatura

Flexibilidade é um aspecto muito importante na tomada de decisões manufatureiras,

A flexibilidade representa uma importante vantagem competitiva para uma unidade de negócio. Pode ser definida como a capacidade de um sistema de manufatura para responder rapidamente a mudanças imprevistas (PAPADOPOULOS et ali., 1993) ou instabilidades causadas pelo ambiente (GUPTA & GOYAL, 1989). Um sistema de manufatura pode apresentar diversos tipos de flexibilidade que podem ser classificados de várias maneiras. Uma dessas maneiras é a análise da flexibilidade partindo de uma perspectiva de curto e longo prazo dada por Browne (GUPTA & GOYAl, 1989; BARAD & SIPPER, 1988). Dentre os principais tipos de flexibilidade tem-se:

a) **Flexibilidade de máquina** – é a capacidade de uma máquina para mudar rapidamente da produção de um tipo de peça para outro.

b) **Flexibilidade de processo –** está relacionada com a capacidade dos sistemas de variar os passos necessários para completar uma tarefa.

c) **Flexibilidade de produto –** é a capacidade para mudar rápida e economicamente de um produto para outro.

d) **Flexibilidade de roteiro –** é a capacidade do sistema de mudar a seqüência de visitação de máquinas (no caso da quebra de uma delas) e continuar produzindo peças. Esta capacidade é devida à existência de diversos roteiros de produção ou ao fato de que uma operação pode ser realizada por mais de uma máquina.

e) **Flexibilidade de Volume** – é a capacidade do sistema (FMS) operar economicamente em diversos volumes de produção.

f) **Flexibilidade de Operação –** é a capacidade para mudar a ordem das operações de produção na fabricação de um produto.

g) **Flexibilidade de Produção** – é referida à capacidade para produzir rápida e economicamente qualquer um dos produtos que um sistema flexível de manufatura é capaz de produzir.

Um considerável número de estudos foi desenvolvido sobre o gerenciamento de FMS. O N*ational Institute of Standards Tecnology* aponta três principais aspectos de problemas abordados em FMS (Goldhar, 1984), que são:

a) Como a arquitetura de controle pode ser simplificada;
b) Por que FMS´s são difíceis de serem configurados;
c) O que pode ser feito para assegurar um alto nível de qualidade nos produtos.

Pode-se considerar que os dois primeiros itens merecem destaque neste trabalho, uma vez que estão diretamente relacionados com o projeto da arquitetura de automação.

O controle e principalmente a integração do sistema são a chave para o desempenho de uma FMS. A integração traduz-se em automação com sistemas de rede de comunicação. Mesmo com um equipamento de automação adequado, um FMS não pode sobreviver com sua performance comprometida devido à defasagem entre o controle e a apropriada integração de suas operações (MAIMON, 1987). Arquiteturas, métodos e protocolos de rede são desenvolvidos para a adequada integração de FMS.

4.2 O Conceito TPS (Manufatura Enxuta).

O conceito TPS (Sistema Toyota de Produção), ou também conhecido como "*lean manufacturing*", ou manufatura enxuta, é uma referência mundial para sistemas de manufatura, em diversos tipos de mercado. De forma resumida, a manufatura enxuta é uma filosofia que busca reduzir o tempo entre a ordem de pedido do cliente de um processo de manufatura e a entrega do produto, eliminando o desperdício. O desperdício é qualquer coisa que não adiciona o valor ao produto na perspectiva do cliente.
O TPS é um sistema robusto, que responde adaptativamente a adversidades internas, como problemas de matéria prima ou variabilidade do produto assim como fatores externos com variação da demanda (Flinchbaugh, 1998).

Podem-se resumir alguns princípios do TPS, que incluem:

a) Tempo de tacto e fluxo contínuo: as operações devem idealmente seguir o ritmo da demanda de cliente. O fluxo contínuo é o ideal, construindo uma parte de cada vez, que tende a minimizar o desperdício, com todas as operações que seguem ao tempo do tacto. O tempo de tacto é o "marca passo" para o fluxo contínuo.

b) Sistema puxado: Esse sistema é usado quando o fluxo contínuo não é praticável. Neste caso um acúmulo pequeno é mantido entre as operações e é reposto sempre pela operação anteriores o que é consumido pelas operações posteriores. Conceitualmente, neste caso, a programação é realizada apenas na operação final, e toda a configuração antecedente reabastece então o que foi consumido por seu cliente imediato.

c) Nivelamento de produção: Em um ambiente com diversidade de produto e com uma grande variação na demanda, é difícil de administrar o atendimento, a não ser com a utilização de um grande inventário grande de todos os produtos ofertados.

O TPS trata essas variações de demanda através da ferramenta chamada “heijunka”, isto é, demanda nivelando criando um pequeno entoque intermediário de e reabastecendo esse usando uma programação nivelada.

O TPS foi um marco tão profundo na organização industrial quanto a criação do modelo de produção em massa do século 19 (VAGHEFI et al. 2001). Apesar de ser um sistema concebido originalmente para processos manuais de manufatura, o TPS prevê que é praticamente impossível uma conversão de um sistema de um sistema de produção convencional para um sistema enxuto sem um mínimo nível de automação. Na verdade para o TPS é necessário determinar o nível ideal de automação. Um nível baixo de automação pode representar perda de eficiência, e por sua vez um nível elevado de automação injustificado acarreta uma queda na confiabilidade devido à complexidade e refletindo em menor domínio sobre o sistema. O nível de automação ideal é aquele que a manutenção e a operação não consomem recursos injustificáveis devido a uma maior complexidade e desperdício de tempo (HARIS, 2001).
Consideram-se também as implicações nas relações de custo/beneficio e produtividade/qualidade de um sistema automatizado. Tal diversidade exige do processo uma grande versatilidade para lidar com diferentes combinações operacionais e funcionais de máquinas, ferramentas e seqüências de processos.

5 SISTEMAS DE MANUFATURA AUTOMATIZADOS

5.1 Breve histórico

A automação da manufatura, como o uso de máquinas CNC´s, robôs, células flexíveis de manufatura e o uso de CAD e CAM iniciou-se no final dos anos 60 e sua difusão no final dos anos 70 nos países desenvolvidos devido aos seguintes fatores (TCHIJOV, 1989):

1. Mudança do paradigma das empresas de produção em massa para produção flexível em lotes;
2. Aumento da importância da qualidade nos itens produzidos aliada a produção de peças de maior complexidade exigindo a substituição do controle humano pelo controle do computador;
3. Resistência social dos trabalhadores dos países desenvolvidos em relação a tarefas monótonas, trabalhos repetitivos, típicos da produção em massa. Isto gerou em países, como o Japão, um aumento considerável dos salários para trabalhos com pouca qualificação.

Porém, o fator preponderante na decisão de compra de um equipamento para a automatização de uma tarefa foi, e ainda é o custo da mão-de-obra versus o valor do investimento na compra da máquina (ISHITANI and KAYA, 1989).

5.2 Vantagens da Automação na Manufatura

Erroneamente apontamos como a primeira e principal vantagem de investimentos em automação a economia de custo de mão-de-obra justificada pela busca por redução nos custos da manufatura em muitos países, inclusive o Brasil. Atualmente, os projetos de automação visam não somente obter economias de custos de mão-de-obra, mas também melhor qualidade dos produtos, produção e entrega mais rápida, volume da produção e redução de custos, principalmente quando são empregados os conceitos da automação flexível. Não podemos esquecer dos fatores de segurança e insalubridade dos operadores expostos ao trabalho na manufatura manual.

Pode-se citar que os principais motivos para investir em automação são:

Aspectos operacionais:

- Redução da ação do homem;
- Aumento do uso do equipamento, sem aumento da mão-de-obra;
- Minimiza os atrasos e interrupções provocados pelos operadores;
- Eliminação de erros de digitação, papéis etc.;
- Maior grau de eficiência e flexibilidade.

Aspectos de processo:

- Redução de perdas de materiais;
- Eliminação da variabilidade nos processos;
- Mudar as formulações, parâmetros, acrescentar ou alterar "receitas";
- Redução dos esforços de validação.

Tendências para a automação:

- Alinhar a estratégia da automação com as estratégias dos negócios.
- Atingir objetivos de desempenho, tais como:

- Melhor qualidade;
- Maior velocidade;
- Melhor confiabilidade;
- Maior flexibilidade;
- Menores custos.

5.3 O Impacto Social na Implantação da Manufatura Automatizada

Ainda que acarrete a substituição de mão-de-obra humana ou mesmo na extinção de uma função realizada por um operador, a automação de uma indústria é indicada sempre quando se detecta a necessidade de torná-la mais produtiva, mais confiável mais segura do ponto de vista de preservar a integridade física do homem.

Em TORII (1989) é analisado o número de trabalhadores substituídos por robôs na indústria automobilística e eletrônica na Coréia do Sul. Nas empresas entrevistadas o número de trabalhadores substituídos por um robô é de dois. Entretanto TORII (1989) ressalta que enquanto na indústria automobilística os processos foram totalmente robotizados e nenhum trabalhador foi mantido na operação, na indústria eletrônica em média metade ou um terço dos trabalhadores foi mantido no processo após a introdução do robô. TANI (1989) expõe o principal uso dos robôs em função dos países.

Verifica-se que na Europa e EUA os robôs foram usados principalmente na indústria automobilística, enquanto no Japão estes foram usados principalmente na montagem de componentes eletrônicos. TANI conclui que esta diferença foi um fator chave para o avanço do Japão na robótica, pois proporcionou que os mesmos passassem a produzir componentes eletrônicos mais baratos e adquirissem uma vantagem comparativa em relação aos EUA e a Europa.

No Japão, uma análise (SAITO e NAKAMURA, 1989) dos efeitos diretos e indiretos.

do uso de robôs na economia japonesa indica, que no período de 1985-1990 com a introdução de 155 mil robôs no Japão, 71 mil empregos foram eliminados, como efeito direto. Por outro lado, como efeito indireto, 48 mil empregos foram gerados ligados a indústria de robôs e aumento de investimentos ligados a maior lucratividade das empresas que utilizaram robôs.

Isso significa que, para cada 2 robôs instalados uma pessoa é demitida diretamente, para cada 3 robôs tem-se uma contratada, e para cada 7 robôs tem-se um emprego eliminado, levando em conta os empregos gerados.

Na Alemanha, o impacto da robótica atingiu principalmente os soldadores com uma eliminação estimada de 60.000 empregos nesta categoria entre os anos de 1995 e 2000. Outros empregos principalmente atingidos pela robótica são o de empacotadores, com uma estimativa de 40.000 empregos eliminados e funcionários de linhas de montagem, com 20.000 empregos eliminados (EDLER and RIBAKOVA,1994). Cabe ressaltar aqui que estes números são estimativas feitas em 1994 a respeito de possíveis demissões para os anos entre 1995 e 2000. Nos efeitos positivos na Alemanha estão empregos gerados na indústria de robôs e na manutenção ligada a robótica, com aumento do número de vagas para engenheiros mecânicos e elétricos com uma qualificação um pouco acima da média.

5.3.1 O Impacto Social no Brasil

O custo da mão-de-obra e a reação social causada pelo medo do desemprego foram as principais causas da automação nos países desenvolvidos. No caso Brasil isso ocorreu de forma diferente.

Apesar dos metalúrgicos receberem salários altos em relação ao resto da população nacional e terem um baixo nível de escolaridade, os salários pagos no Brasil têm um custo muito pequeno em relação ao custo da mão-de-obra nos países desenvolvidos.

Nos anos 80, o custo com mão-de-obra direta representava menos que 5% do custo total do veículo para as montadoras brasileiras. O salário pago no Brasil ficava em torno de 20% de um salário pago nos países desenvolvidos (TAUILE, 1986). Tauile argumenta em seu trabalho que o tempo de pagamento (pay-off time) de um robô nos anos 80 era de 32 anos, inferior a sua vida útil, estimada em 10 anos.

No que se refere a acordos trabalhistas, não existe aqui a rigidez encontrada nos EUA e na Europa em relação a força de trabalho (MARQUES, 1990, pág. 66). No Brasil, é comum os operadores serem deslocados de função quando há nisso interesse da empresa.

Sobre o papel dos sindicatos, cabe ainda ressaltar que durante o período da ditadura estes tiveram pouco poder de pressão sobre as empresas, contribuindo para que o controle da empresa sobre o trabalhador fosse muito mais forte no Brasil que em países que viviam uma democracia.

O que de fato levou as montadoras a se automatizarem foi a estratégia mundial adotada pelas matrizes. Nos anos 80, as montadoras lançaram o conceito de "carro mundial", um automóvel que seria produzido em partes ou uma única planta, mas teria como destino a comercialização internacional. Além do carro mundial, ocorreria a especialização de algumas filiais na produção de alguns componentes.

Com isso, surgiu nas plantas brasileiras a necessidade de produzir segundo padrões de qualidade mais rígidos, tais quais os internacionais. Agora, duas ou mais filiais deveriam ser capazes de produzir o mesmo tipo de veículo, a mesma peça, dentro das mesmas tolerâncias.

A produção não poderia continuar com oscilações na qualidade do que era produzido: era necessária uma padronização, uma uniformidade. Tal padronização, segundo a decisão da matriz, seria obtida com o uso de máquinas, com a automatização.

Os padrões de qualidade do mercado internacional orientaram a automação das montadoras no Brasil, as principais áreas automatizadas foram na montagem de carrocerias, a pintura e a fundição.

Cabe destacar que, no caso dos processos de pintura e brazagem (durante a montagem de carrocerias), a automação é muito justificada nos países desenvolvidos, por ser uma atividade insalubre. Entretanto, no Brasil, somente a pintura externa foi automatizada, já que esta deveria atender aos requisitos de qualidade. A pintura interna e inferior do automóvel foi mantida na forma manual. Ou seja, a eliminação de postos de trabalho insalubres no Brasil não foi uma das razões para a automatização dos processos (MARQUES, 1990)

5.4 A Pirâmide da Automação Industrial

A automação industrial exige a realização de muitas funções. A Figura 5.1 representa a chamada arquitetura da automação industrial, com os diferentes níveis de automação encontrados em uma planta industrial.

A seguir é realizada uma breve descrição de cada um dos níveis da pirâmide:

Nível 1: É o nível das máquinas, dispositivos e componentes (chão de fábrica), onde a automação é realizada pelo controlador programável e seus periféricos. Ex.: linhas de processo de soldagem robotizadas, transportadores.

Nível 2: Sua característica é ter algum tipo de supervisão associada ao processo. É o nível onde se encontram concentradores de informações sobre o Nível 1 e as Interfaces Homem-Máquina (IHM).
Ex.: IHM de operação de uma célula de montagem de portas automotivas, sala de supervisão de um laminador.

Nível 3: permite o controle do processo produtivo da planta. Normalmente é constituído por bancos de dados com informações dos índices de qualidade da produção, relatórios e estatísticas de processo, índice de produtividade, algoritmos de otimização da operação produtiva.
Ex.: Avaliação e controle da qualidade de dimensional de medição on-line de carrocerias.

Nível 4: é o nível responsável pela programação e planejamento da produção realizando o controle e a logística dos suprimentos.
Ex.: controle de suprimentos e estoques em função dos fornecedores, gerenciamento de cadeia de fornecedores *just-in-time*.

Nível 5: é o nível responsável pela administração dos recursos da empresa, em que se encontram os softwares para gestão de vendas e gestão financeira; é também onde se nrealizam a decisão e o gerenciamento de todo o sistema.
Ex: Sistema ERP.

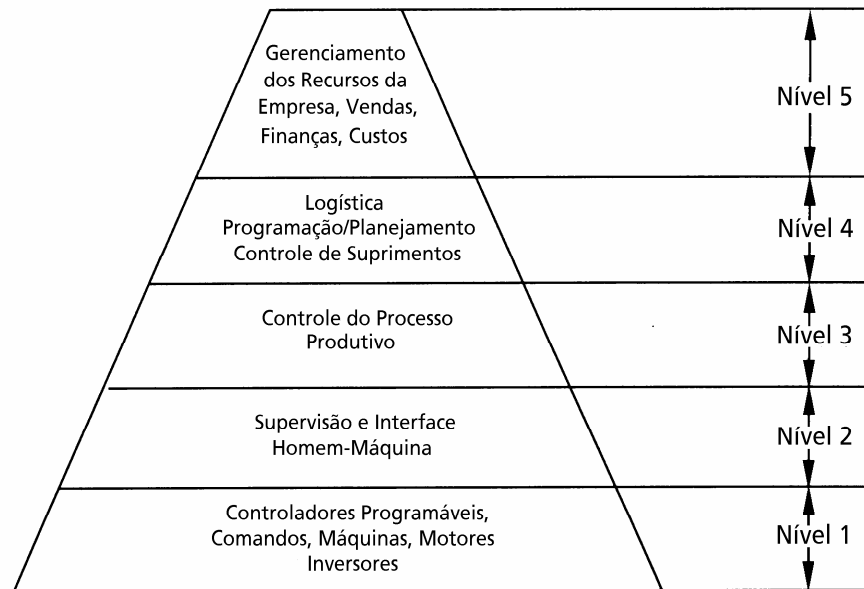



Fig.5.1: Pirâmide da automação (CASTRUCCI e MORAES, 2001).

5.5 Sistemas de Automação Balanceada (BAS):

No contexto de sistemas automatizados de produção, a automação balanceada surge como uma alternativa que engloba o conceito de um nível apropriado de automação tecnológica (CAMARINHA, 95), em oposição às abordagens isoladas de sistemas centrados exclusivamente no ser humano ou exclusivamente na automação total das máquinas.

Considera-se, que para incrementar a produtividade na manufatura é fundamental dominar as técnicas de automação e integração por computador das linhas de produção utilizando ferramentas como CAD, CAM, CAPP e máquinas CNC/DNC. Entretanto, é necessário ainda considerar questões como "start-up", manutenção e ocorrência de distúrbios ou situações inesperadas (envolvendo máquinas e operadores humanos) que acontecem freqüentemente numa fábrica e que não podem ser tratadas de maneira automática na sua totalidade.

Estas tarefas envolvem, geralmente, a supervisão e interferência de um operador humano.

Apresenta-se, Tabela 5.1, uma comparação entre sistemas de produção entrados na tecnologia e no homem.

Tab.5.1: Sistemas de produção centrado na tecnologia e no Homem.

Centrado na tecnologia	**Centrado no homem**
Considera a introdução de novas tecnologias para reduzir o número de operadores no chão de fábrica.	Considera a introdução' de novas tecnologias para complementar as capacidades humanas e tecnológicas, incremento funcional da flexibilidade, Qualidade do produto e conforto dos operadores.
Procura substituir as habilidades e experiência humana por tecnologia.	Procura melhorar a qualidade e estabilidade do recurso humano e, através disto, melhorar a exploração do potencial oferecido por novas tecnologias.
Considera soluções técnicas centralizadas.	Considera soluções técnicas descentralizadas.
Considera uma hierarquia rígida (pouca liberdade) na tomada de decisões.	Considera a participação dos operários na tomada de decisões.
Considera uma função operacional passiva, isto é, a simples execução de tarefas.	Considera uma autonomia operacional para desempenhar tarefas diferentes e complexas, os problemas podem ser resolvidos individualmente ou em qrupo.
A integração de unidades de informação, decisão e controle da fábrica é por meio de uma centralização auxiliada por computador.	Considera a integração de unidades para treinamento, socialização, cooperação e acesso à informação, participação na tomada de decisões e autocontrole.

Com a evolução dos sistemas produtivos, um amplo conjunto de tarefas tem sido automatizado, deslocando os operadores para o pré e pós-processamento das máquinas. Uma razão para isto é a relativa redução dos custos de computadores e de máquinas automatizadas comparadas com os custos de treinamento e manutenção de operadores devidamente qualificados. No entanto, o conhecimento, experiência e habilidades humanas são características que na maioria das situações dependem de métodos não triviais para serem estruturados e/ou reproduzidos. Baseado neste fato, é imprescindível que o planejamento de sistemas produtivos considere além dos aspectos tecnológicos, o conjunto dos recursos humanos e a estrutura organizacional da empresa (Wobbe, 91).

5.6 Nível de Automação em Linhas de Montagem de Carrocerias.

O método de graduação do nível de automação em um processo de produção é muito particular para cada área de manufatura, e mesmo para processos similares, não há normalização ou regras estabelecidas. Há ainda variações entre empresas pertencentes aos mesmos setores da indústria.

Focando no nosso estudo, pode-se citar que os critérios para a escolha do nível de automação de um processo de montagem de carrocerias automotivas levam em consideração alguns pontos descritos abaixo:

a) Quantidade a ser produzida;
b) Qualidade exigida;
c) Processos envolvidos na montagem;
d) Fatores sociais e estratégicos.

O Cálculo utilizado na engenharia de manufatura de armação de carrocerias da Volkswagen para calcular o nível de automação em uma linha de montagem de carrocerias é descrito abaixo:

$$MEGR = \frac{\sum tarefas\ automáticas}{\sum tarefas\ manuais + \sum tarefas\ automáticas} \qquad \textbf{(5.1)}$$

Onde:

MEGR: Nível de automação ou grau de mecanização/automação (“Mechanisierungsgrad“)

Σ “Tarefas manuais”: Somatório de todas as tarefas manuais, onde 1 tarefa= a um operador que exerça uma tarefa direta na aplicação do processo de junção e ou movimentação.

Σ “Tarefas automáticas”: Somatório de todos os robôs dispostos no layout.

Obs.: Deve ser considerado um índice proporcionalidade de acordo com a tecnologia de com a aplicação do robô na referente tecnologia de junção:

Exemplo:

Aplicados no processo de Solda Ponto, MIG/MAG, aplicação de Cola, e = 1;

Robô aplicado ao processo de grafagem (conformação) = 2;

Aplicações de solda LASER (devido à velocidade da aplicação)= 2,5.

Exemplo de cálculo:

Contabilizando todas as tarefas em uma linha de produção obtêm-se:

- Soma das tarefas automáticas: 423 Robôs.
- Soma das tarefas manuais: 100 Trabalhadores diretos ligados ao processo de manufatura.

$$MEGR = \frac{423 * tarefas\ automáticas}{100 * tarefas\ manuais + 423 * tarefas\ automáticas} \quad \textbf{(5.2)}$$

Logo o grau de automação na linha de produção exposta neste exemplo é de:
MEGR= 81%.

6 AUTOMAÇÃO EM MONTAGEM DE CARROCERIAS AUTOMOTIVAS ROBOTIZADAS

No prisma dos sistemas de manufatura flexíveis (FMS), destacam-se as seguintes tecnologias aplicadas na automação de células de montagem de carrocerias automotivas: Robôs, Controladores Programáveis e Interfaces (vide capítulo 7).

6.1 Definições de Robôs Industriais

Um robô industrial pode ser definido como "um sistema mecânico articulado que tem como objetivo principal executar operações pré-definidas".
Isso é realizado através da unidade de controle, que indica o que o manipulador fará para que o robô realize as tarefas especificadas. Normalmente, ele é constituído de seis (6) graus de liberdade. Sua trajetória é definida através de um conjunto de ângulos/translações, associados ao movimento angular/linear de cada grau de liberdade do robô, que, após um algoritmo de interpolação, servirá como sinal de referência para o controlador de posição de cada junta robótica, que realizará uma comparação com os sinais provenientes dos transdutores de posição das juntas.
Diversas aplicações industriais exigem que o robô trabalhe de acordo com a posição e orientação de seu elemento terminal em relação ao sistema de coordenadas de trabalho. Por exemplo: um robô trabalhando em conjunto com uma máquina de comando numérico, numa célula automatizada com outros robôs; ou ainda quando o robô é dotado de um sistema de visão.
Nesse último caso, a interpretação das imagens será efetuada em relação ao sistema de coordenadas de trabalho (em duas ou três dimensões), e as informações extraídas serão transmitidas ao sistema de supervisão após tratamento apropriado.

O supervisor de controle, ou unidade de controle, é responsável pela geração dos sinais de referência individuais ao longo do tempo, para cada junta do robô. Através

de uma malha de controle de posição independente para cada junta, esses sinais são comparados aos valores atuais (obtidos através dos sensores de posição articular).

Entretanto, os valores das variáveis articulares utilizados como sinal de referência na malha de controle de posição das juntas, quando comparados com os valores reais de posicionamento, podem traduzir um erro que aumenta com a velocidade de operação.

Conseqüentemente, a implementação de um controlador de posição para um robô industrial exige o conhecimento da precisão cinemática do movimento do manipulador.

Para estabelecermos estratégias de controle de posição de juntas robóticas eficientes e precisas, (erro próximo de zero), o movimento do robô é descrito através de equações diferenciais, levando-se em consideração sua arquitetura construtiva, a massa dos diferentes elementos, as inércias e o tensor de inércia, relativamente à carga transportada, e considerando-se também a modelagem completa de seu sistema de acionamento (motor-redutor) (PAUL, 1981).

Um robô industrial é definido como um manipulador multifuncional reprogramável, projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais, através de diversos movimentos programados, para o desempenho de uma variedade de tarefas (RIVIN, 1988).

Uma definição mais completa é apresentada pela norma *Robotic Industries Association* (RIA) 10218: "uma máquina manipuladora, com vários graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial".

Define-se um sistema robótico em (SCIAVICCO, 1996):

a) **Manipulador**: uma seqüência de corpos rígidos (elos) conectados através de articulações (juntas).
b) **Atuadores**: para posicionar o manipulador, as juntas são movimentadas através de atuadores. Os motores utilizados são tipicamente elétricos, mas ocasionalmente hidráulicos e pneumáticos.
c) **Sensores**: para medirem a posição, o *status* do manipulador e, se necessário, o *status* do ambiente.
d) **Sistema de Controle**: permite o controle e a supervisão da movimentação do manipulador.

O manipulador é formado por elos ligados através de juntas (OLIVEIRA, 2004):
O número de juntas determina os graus de liberdade de um manipulador (SPONG, 1989). Tipicamente, um manipulador deve possuir no mínimo 6 graus de liberdade independentes: três para posicionamento e três para orientação do efetuador final. Um manipulador com menos de 6 graus de liberdade não consegue atingir todos os pontos de seu espaço de trabalho com uma orientação arbitrária (Figura 6.1).
Já um manipulador com mais de seis graus é dito redundante, pois pode atingir qualquer ponto com uma orientação arbitrária através de infinitas configurações.

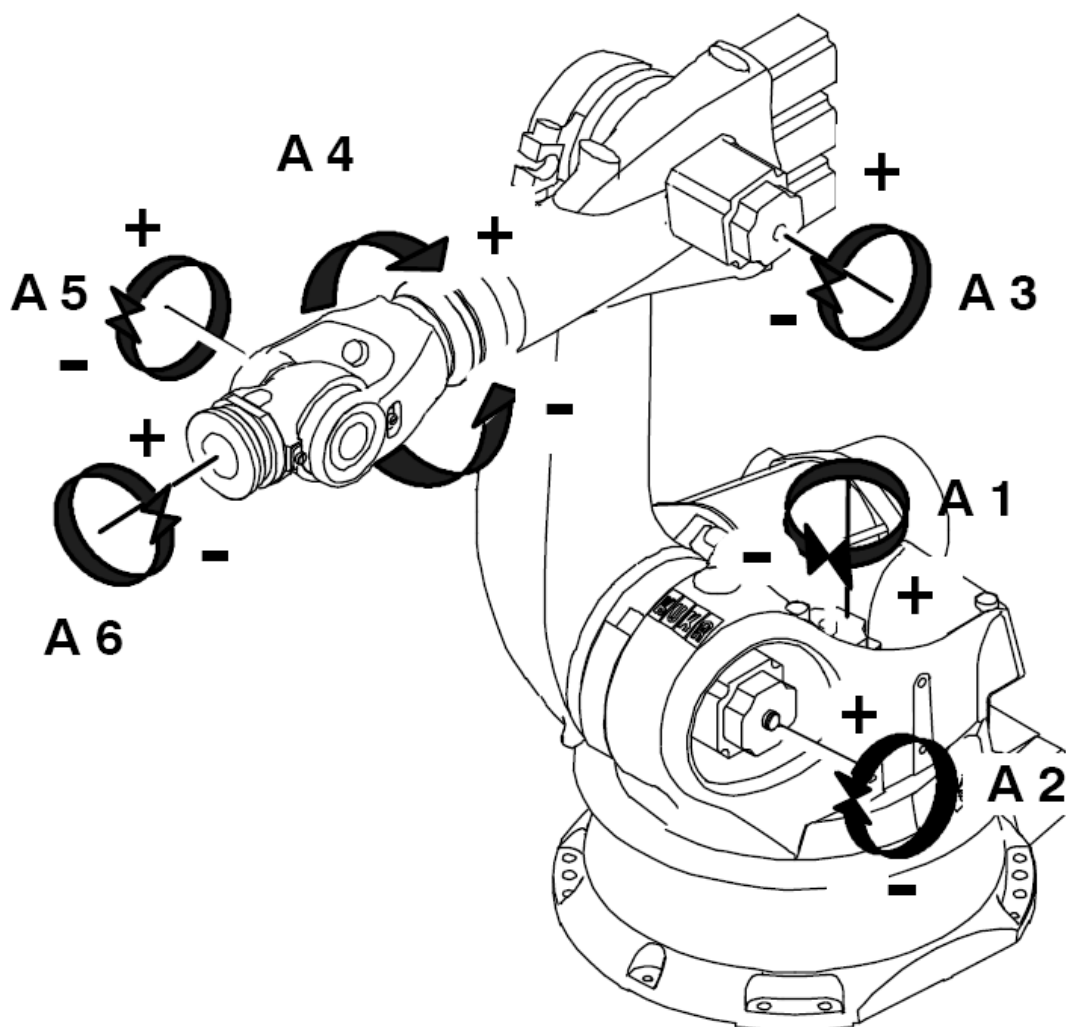



Figura 6.1 Robô com seis graus de liberdade (componente básico de um sistema flexível para soldagem de carroceria).

6.2 Aplicações de Robôs Industriais

A própria definição de robô industrial já fornece uma idéia das variadas aplicações que podem ser realizadas com esse equipamento: “um manipulador multifuncional reprogramável, projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais, através de diversos movimentos programados, para o desempenho de uma variedade de tarefas",

Já foi dito que as características operacionais de um robô industrial dependem essencialmente de sua configuração, das indicações de desempenho apontadas nos catálogos dos fabricantes e das tarefas planejadas a serem realizadas.

Para cada tarefa, geralmente se faz uso de diferentes atuadores, os quais são selecionados especialmente para promover a correta interação entre a extremidade terminal do manipulador mecânico e o objeto a ser trabalhado.

Os principais fabricantes de robôs industriais oferecem aos usuários diferentes configurações de manipuladores. Entretanto, alguns deles se especializaram em produzir robôs para aplicações específicas, obtendo assim melhores desempenhos operacionais.

Entre as mais importantes empresas que fabricam robôs industriais encontram-se: *ABB Robotics AB, Adept Technology Inc., Comau SPA, Daihen Co., Fanuc Ltd, Kawasaki Robotics Inc., Kuka Roboter GmbH, Motoman Inc., Nachi Co., e Stäubli AG.*

Uma das aplicações mais comuns de robôs industriais é a soldagem. Aproximadamente 25% dos robôs são empregados em diferentes aplicações de soldagem. Na montagem de carrocerias automotivas os processos de soldagem por resistência e brazagem representam, aproximadamente, 80% do tempo de fabricação da carroceria bruta. A montagem de componentes corresponde a aproximadamente 33% das aplicações de robôs (1997) que são empregados pelas indústrias automobilísticas e, principalmente, na área de montagem de carrocerias.

A maioria das atividades relacionadas a robôs industriais em processos de produção envolvem operações de movimentação, processamento e controle de qualidade.

A seguir, são apresentadas algumas destas atividades:

a) Movimentação:

- Movimentação de peças entre posições definidas;
- Transporte de peças entre esteira transportadora e máquinas operatrizes;
- Carregamento e descarregamento de peças em máquinas operatrizes;
- Carregamento e descarregamento de peças em magazines:

b) Processamento:

- Soldagem por resistência elétrica (pontos) ou a arco (contínua);
- Fixação de circuitos integrados em placas;
- Pintura e envernizamento de superfícies;
- Montagem de peças;
- Acabamento superficial;
- Limpeza através de jato de água e abrasivos;
- Corte através de processo de plasma, laser, oxi-corte ou jato de água;
- Fixação de partes com parafuso, deposição de cola, rebites;
- Empacotamento.

c) Controle de qualidade:

- Inspeção por visão;
- Verificação dimensional de peças através de sensores.

6.3 Sistemas Flexíveis de Produção e Robótica de Manipulação Industrial.

A robótica trata de máquinas multifuncionais e reprogramáveis que podem executar tarefas normalmente associadas a seres humanos, possuindo também a capacidade de identificar alterações nas condições e restrições colocadas pela tarefa e/ou pelo ambiente, decidir quais as ações que devem ser tomadas e planejar a sua execução (PIRES, 2002).

O desenvolvimento deste tipo de máquinas introduziu um elevado grau de flexibilidade nos ambientes de produção atuais, dada a sua flexibilidade de utilização em diferentes tarefas através de simples adaptações: mudança de ferramenta e reprogramação. Atualmente, os sistemas de produção automatizados são fundamentais para as economias modernas, visto que a sua riqueza (o seu Produto Nacional) depende essencialmente das suas instalações de produção: a riqueza cultivada ou extraída emprega tipicamente menos de 10% da população ativa e contribui muito pouco para a riqueza nacional (PIRES, 2002). Por isso, os sistemas de produção atuais, são cada vez mais sistemas flexíveis.

A automatização rígida que caracterizou as décadas 50-80 (denominado período de ouro para a produção industrial), constituída por máquinas dedicadas de elevada capacidade de produção, não se adapta aos novos tempos.

Atualmente, a enorme diversidade de produtos, o desaparecimento das fronteiras comerciais, aliada à exigência de maior qualidade e de menor preço, torna o ciclo de vida dos produtos muito curto. Assim, as empresas funcionam geralmente com produções em pequena/média escala (small/medium batch manufacturing) em que a definição do produto é feita muitas vezes pelo cliente (job-shop manufacturing). Isso é incompatível com sistemas de produção rígidos, direcionados para produção em larga escala de um determinado produto ou tipo de produto. Para além disso, as características de mercado favorecem a denominada “Zona da Robótica”, e é por isso que se tem assistido a uma robotização crescente das estruturas produtivas.

Na tabela 6.1 observamos a crescente evolução dos estoques operacionais de robôs.

Tabela 6.1 a Evolução dos estoques operacionais desde 1995 a 1999, com previsão para 2003.

País	1995	1999	2003
Japão	387290	402212	384700
EUA	66286	92860	155400
Alemanha	51375	81203	109500
França	13276	18163	28200
Suécia	4459	5595	
Reino Unido	8314	11537	14900
Dinamarca	672	1169	
Austrália	1840	2871	
Taiwan	3849	6422	
Portugal	~600	~900	
CEE	114699	176210	262300
...	...	...	...
Total	615100	742500	892200

O que esses números mostram e que devido a redução do **custo** e surgimento de novas **motivações,** tem viabilizado novos projetos de automação robotizada nos últimos anos. As **motivações**, apesar de interessantes, ainda são limitadas e os custos são ainda grandes no plano econômico e, essencialmente, no plano operacional.

Podemos citar as principais motivações para o investimento em automação robotizada:

Motivações:

- Exigência de maior qualidade a menor custo;
- Diversidade de produtos: várias opções geralmente definidas pelos clientes, num mercado altamente competitivo e globalizado;
- Densidade de componentes por produto, recorrendo frequentemente a miniaturização;
- Ciclo de vida dos produtos é muito curto;

Isto requer sistemas produtivos altamente flexíveis, caracterizados por produções em pequena/média escala (*small/medium batch manufacturing*) orientadas para as exigências dos clientes (*job shop manufacturing*) (Figura 6.2). Nestes sistemas os robôs desempenham um papel fundamental visto que são sistemas programáveis, possuindo ambientes de programação relativamente poderosos;

- É possível definir posições, trajetórias e outras ações que podem ser repetidas continuamente com elevada precisão e repetibilidade. Aliás essa é a essência dos robôs atuais, isto é, são estruturas com um controle preciso de movimento e algumas capacidades de programação que permitem definir esses movimentos e repeti-los;
- Possuem capacidades de entradas e saídas de comunicações o que permite coordenar ações com outros equipamentos, e serem integrados com os sistemas informatizados e de gestão existentes na instalação produtiva.

Custos:

- Os robôs são equipamentos relativamente caros. No entanto, a maior parte do esforço econômico vai para os equipamentos restantes de uma célula e que proporcionam o ambiente para a operação do robô: autômatos, transportadores, sensores inteligentes, software, etc.
- Necessidade de pessoal técnico especializado. Os robôs retiram determinadas tarefas dos humanos, pois as executam com maior eficiência. Mas por outro lado, exigem engenheiros especializados para o projeto e desenvolvimento de novas células, e operários capazes de programar, utilizar e manter os sistemas.
- Aumento de complexidade. A robotização e de uma forma geral toda a automatização, aumenta a complexidade dos sistemas. O grau de complexidade aumenta ainda se incluir-mos as tarefas de programação e sincronismo de tarefas dentro da célula tendo em vista determinado tipo de produção.

As **motivações**, precisam ainda de ser reforçadas nos próximos anos com o desenvolvimento de máquinas mais inteligentes, mais leves (e com elementos flexíveis) e mais fáceis de programar, por exemplo usando um ambiente gráfico integrado e padronizado que permita projetar, simular e programar células robotizadas.

Os **custos** são ainda altos, principalmente devido à falta de pessoal técnico especializado nas empresas.

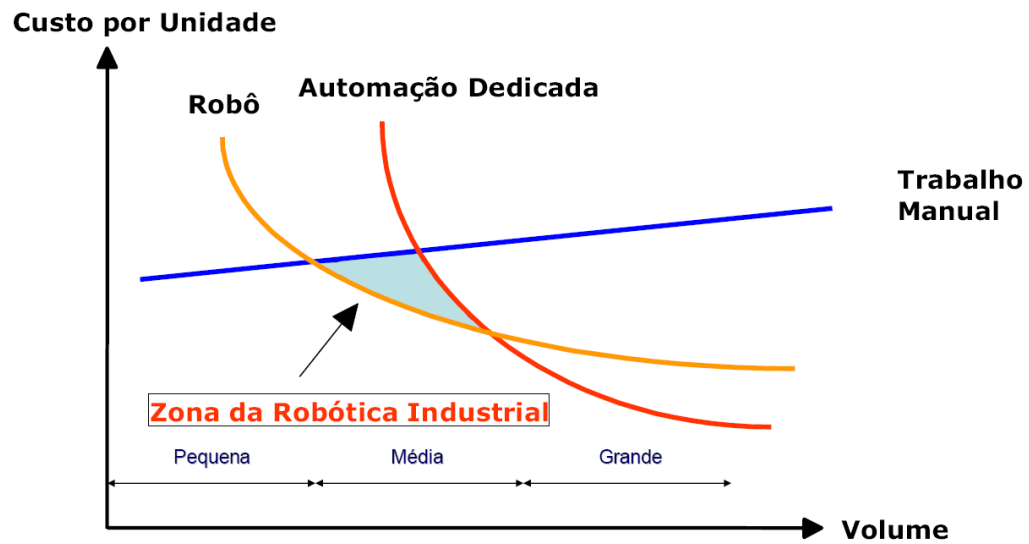



Figura 6.2: O investimento com a robotização encontra maiores vantagens para volumes de produção intermediários.

6.4 Processo de Soldagem Robotizada

Soldagem robotizada é uma forma específica de soldagem automática e é definida pela AWS como a soldagem feita com equipamento (robô, manipulador, etc.), o qual executa operações de soldagem, após programação, sem ajuste ou controle por parte do operador de solda.

O primeiro processo de soldagem a ser robotizado foi por resistência elétrica por pontos (RSW), surgida na década de 70 e foi introduzido, inicialmente, na indústria automobilística. Isso mudou completamente a concepção da linha de produção de automóveis, pois a precisão e a produtividade aumentaram significativamente. Hoje, ainda pode-se considerar que este é o procedimento mais utilizado no processo de montagem de carrocerias juntamente com a solda MIG/MAG (GMAW). Este processo de soldagem com eletrodo sólido, contínuo, sob proteção gasosa (GMAW) é, entre os vários processos existentes, o mais utilizado em soldagem robotizada na indústria.

Os processos de soldagem com interface com os robôs industriais atualmente existentes são:

GMAW, (*gas metal arc welding*), processo de soldagem com eletrodo contínuo sob proteção gasosa, também conhecido como MIG/MAG;
GTAW, (*gas tungsten arc welding*), soldagem TIG;
LBW, (*laser beam welding*), soldagem a LASER;
PAW, (*plasma arc welding*), soldagem a plasma;
RSW, (*resistance spot welding*), soldagem por resistência elétrica por pontos.

6.4.1 Soldagem com Eletrodo Sólido Contínuo sob Proteção Gasosa:

Nesse processo, o arco elétrico aquece a peça e o eletrodo (arame), cujo fornecimento é contínuo, fundindo-os e formando o metal de solda que é distribuído através do movimento da tocha pelo manipulador sobre a junta a ser soldada. O equipamento necessário para o processo, inclui uma fonte de energia de soldagem de tensão constante, um alimentador de arame interconectado a uma fonte para controle de velocidade do arame, uma tocha de soldagem, e um sistema de fornecimento de gás de proteção, que pode ser uma rede de gás ou um cilindro com reguladores de vazão do gás.

Tanto o arco quanto o metal de solda fundido são protegidos por uma atmosfera de gases: gás ativo (C02) ou gás inerte (argônio ou hélio), ou ainda, uma mistura de gases ativo e inerte, através da tocha de soldagem. Misturas de gás argônio (inerte) e CO2 (ativo) são freqüentemente utilizadas e podem variar de 98% de argônio e 2% de CO2, até 75% de argônio e 25% de CO2. Em algumas aplicações, adicionam-se pequenas quantidades de oxigênio (02) ao argônio ou à mistura argônio/C02.

Inicialmente, o processo foi utilizado na soldagem de alumínio, mas hoje, é muito empregado na soldagem dos metais comerciais, incluindo o aço carbono e suas ligas, aço inoxidável, e metais não-ferrosos como o cobre. Aprimoramentos realizados nos últimos anos reduziram significativamente os respingos e melhoraram a aparência de cordão de solda, fazendo do processo um dos mais utilizados na indústria. Um sistema de aplicação de solda é composto por vários elementos que necessitam de algumas considerações. Na tabela abaixo, pode-se exemplificar os componentes básicos de um sistema para soldagem robotizada.

Tabela 6.2 Componentes básicos de um sistema para soldagem robotizada.

Componentes básicos	Considerações importantes
Robô	Graus de liberdade, envelope de trabalho; destreza (precisão); fonte de energia; repetibilidade; velocidade; capacidade de carga; tipo de acionadores.
Controle computacional do robô (unidade de controle)	Técnica de programação; sistema feedback de controle; tamanho da memória e do arquivo de backup; armazenamento do programa; interfaces; softwares especiais de soldagem.
Fonte de energia para soldagem	Ciclo de trabalho (usualmente,100 é desejável); interface com o controle do robô; precisão (corrige pequenas flutuações da tensão do arco) e capacidade de constantemente iniciar o arco elétrico.
Equipamentos e acessórios para soldagem	Tipo de alimentador do arame; tipo de controle; interface com o controle do robô; tocha de soldagem (capacidade. precisão; dimensões); cabos (comprimento e montagem); ferramentas para alinhamento; estação de limpeza do bocal da tocha; estação do operador e equipamentos de segurança.

6.4.2 Aplicação, Escolha e Aquisição de Robôs para Soldagem

A escolha de um robô está relacionada com a tecnologia a ele agregada. Aconselha-se a adquirir aquele que tenha a maior qualidade e a melhor repetibilidade possível. Atualmente, um robô de seis graus de liberdade é mais indicado para as operações em soldagem do que aqueles que têm menos graus de liberdade, isso por que é mais flexível (consegue alcançar todos os pontos de seu espaço de trabalho), entre os robôs de seis eixos no mercado é possível optar de acordo com o alcance (envelope) e a capacidade de carga em kg (kilogramas) e a precisão.

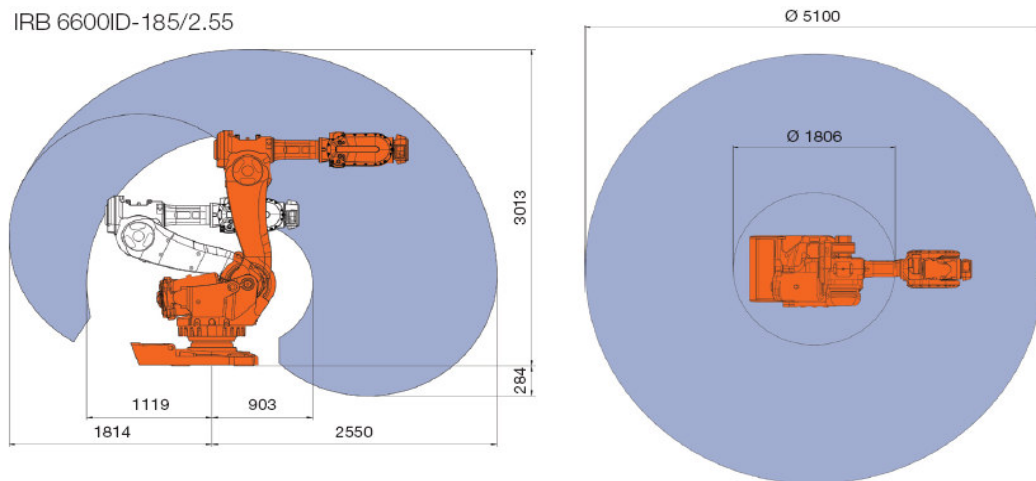



Figura 6.3: Análise do “envelope” de um robô de seis eixos. Esta especificação, juntamente com a capacidade de carga e a precisão, descreve tecnicamente um robô. O conhecimento dessas especificações básicas é essencial para a determinação de sua aplicação.

Outro fator importante é a segurança. Embora essa responsabilidade, na célula robótica, seja da empresa e do operador, o robô deve oferecer vários níveis de segurança: desde o total travamento dos servomotores até a implantação de barreiras físicas entre o ele e seu operador, passando pela verificação de seu posicionamento e velocidade pelo programa.

Para determinar qual robô de soldagem é mais indicado para uma planta industrial, deve-se levar em consideração alguns pontos muito importantes, que podem alterar significativamente o projeto original da peça a ser soldada:

a) No caso de ser um projeto novo, leva-se em conta a possibilidade de se realizar a soldagem em pontos que dêem à peça resistência suficiente para utilização, porém que minimizem tensões residuais, distorções, elevados campos de temperatura, etc. Deve-se observar a melhoria da tolerância da peça e a repetibilidade garantida pelo processo de manufatura das peças.

b) Dispositivos de fixação em mesas giratórias, onde um conjunto é soldado enquanto o outro está sendo montado, têm sido muito utilizados. A integração entre esses dispositivos e o robô é relativamente fácil de realizar. Em alguns casos, é possível optar por sistemas com alguns graus de liberdade, que podem ser integrados com o robô. Porém, quando, se aumenta o número de graus de liberdade, aumenta-se também a complexidade da programação.

c) Finalmente, as considerações quanto à produção. O número total de soldas e o comprimento de cada uma estão relacionados ao tempo de soldagem e ao gasto de material. Em alguns casos, não é possível reduzir o comprimento das soldas para compensar esses dois fatores. Na maioria dos casos, entretanto, levando em consideração a estabilidade do robô, pode-se aumentar as velocidades de intervalo entre os cordões compensando o tempo de soldagem. Deve-se sempre analisar e focar as vantagens desejadas e proporcionadas com o projeto de automação. Ou seja: deseja-se aumentar o volume da produção com a robotização do processo de

soldagem, melhorar a qualidade das peças ou realizar procedimentos de soldagem com segurança?

E, finalmente, assim como em todo projeto de automação, o retorno do investimento deverá ser considerado.

Em suma, há três categorias que devem ser sempre consideradas para determinar o que é mais importante na aplicação de um processo de solda robotizada: o controle de qualidade, economia de gastos na manufatura e fatores trabalhistas. Esses itens também podem ser decisivos para viabilizar ou não um projeto de soldagem automatizada por robôs. É na combinação dessas categorias que encaixam os itens apresentados na Figura 6.4.

.

O Projeto das partes

- A posição requerida para a operação de soldagem;
- O acesso da ferramenta de solda as juntas;
- O processo de manufatura das partes a serem soldadas;
- Soldabilidade dos materiais.

Fatores competitivos

- Tempo de fabricação;
- Custo da montagem;
- Tempo de ciclo requerido;
- Qualidade exigida;
- Exigência para atender norma.

Mão de Obra

- Disponibilidade de operador no mercado de trabalho;
- Nível de habilidade dos operadores.

Condições de manufatura

- Disponibilidade de espaço físico na planta;
- Fluxo material na planta;
- Ambientais (Fumos de solda);
- Segurança do homem (exposição aos perigos), doenças ocupacionais, etc.

Exigências da produção

- Volumes de produção;
- Número variedade de produtos em uma única célula (flexibilidade);
- A freqüência dos set-ups para os diferentes produtos.

Figura 6.4- Fatores relevantes para um projeto de automação da solda robotizada.

7 A ARQUITETURA DE AUTOMAÇÃO DE CÉLULAS DE MONTAGEM DE CARROCERIAS AUTOMOTIVAS.

Um projeto de automação de linha de montagem de carrocerias automotivas compostas por células, necessita adotar uma arquitetura como base para padronização. Esta arquitetura padronizada irá compor as diversas células.
O projeto de uma arquitetura irá determinar o sucesso de um sistema a fim de alcançar os seus objetivos de desempenho, modularidade, expansibilidade e custo.
As soluções irão depender das limitações de cada projeto.
Há vários pontos que o projetista deve considerar ao iniciar o projeto.
Uma arquitetura básica é formada por esses principais elementos:

CLP: O controlador principal, responsável por sincronizar a atuação dos elementos que compõem uma célula como: dispositivos de fixação, robôs, transportadores e dispositivos de junção (solda, adesivos, Brazagem, etc.).

IHM: Sua principal função é fornecer todas as informações essenciais e permitir a operação de todo o sistema ao operador.

Redes de comunicação: Representam a interface de comunicação e controle de todos os elementos na arquitetura adotada.

7.1 CLP (Controlador lógico programável)

Um dos principais elementos de controle de SED utilizado amplamente na indústria, tem sido o CLP (controladores lógicos programáveis).
WARNOCK (1997), um CLP é definido como "um sistema eletrônico de operação digital desenvolvido para uso em ambiente industrial que possui memória programável para o armazenamento interno de instruções e que implementa funções específicas de lógica, seqüenciamento, temporização e aritmética para controle através de módulos de E/S digitais ou analógicos de vários tipos de máquinas ou processos".

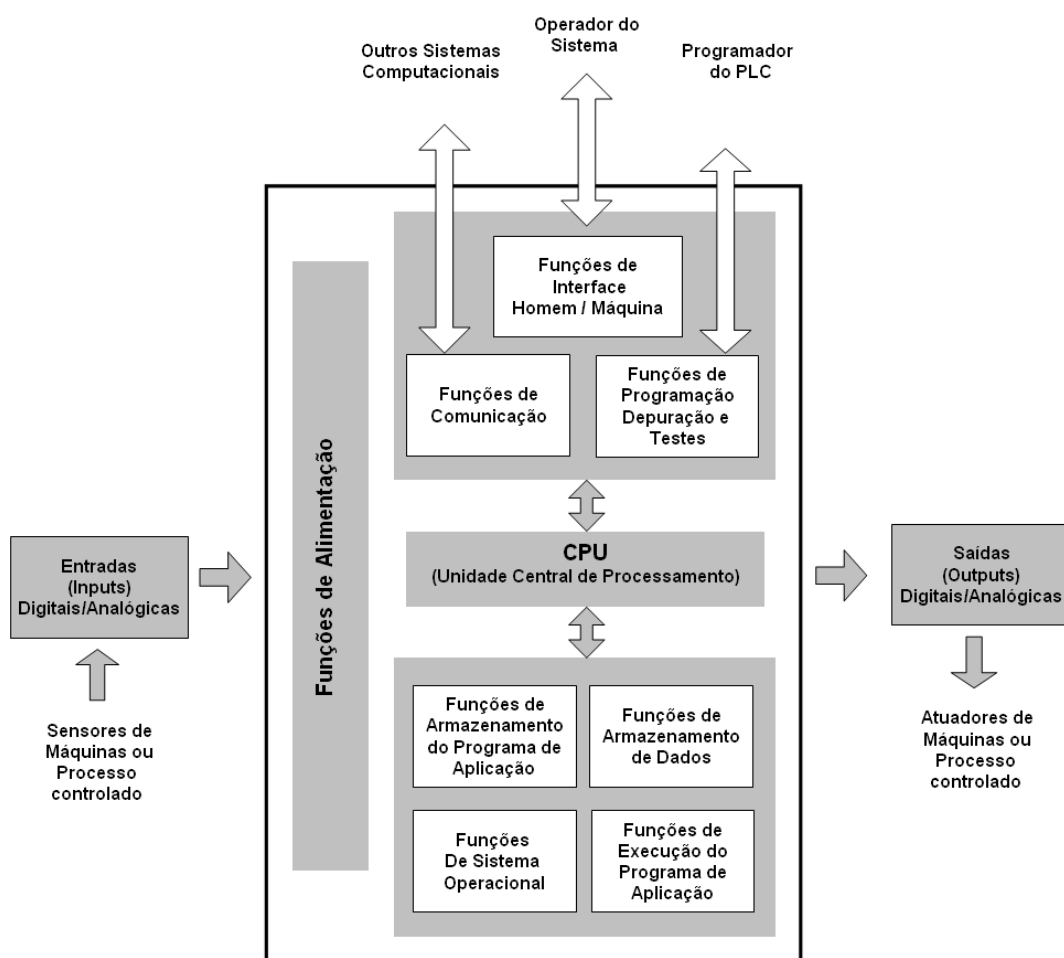
Os CLP's ou PLC's *(Programmable Logic Controllers)* são elementos fundamentais nos sistemas de automação industriais modernos, e são os elementos de controle principal em uma linha de montagem de carrocerias automotivas.

De uma forma geral, todos os sistemas de automação industrial tendem a incluir um ou mais CLP's em suas soluções automáticas. No caso de linhas de montagem de carrocerias automotivas é comum adotar um CLP seguindo as divisões das células, ou seja, um CLP por célula ou por agrupamento de células. O que deve ser levado em consideração é a complexidade do programa de controle e o número de equipamentos que irá controlar (por exemplo a quantidade de robôs em determinada célula).
Um CLP possui uma arquitetura, sistema operacional, linguagem de programação e entradas/saídas. A sua forma construtiva adapta-se perfeitamente à utilização de aplicações de controle seqüencial em ambiente industrial: podem estar sujeitas às variações de temperatura, vibrações, pequenas perturbações na alimentação, ruído elétrico, etc.
As dimensões físicas a facilidade de programação e o funcionamento cíclico assegurado por um determinado programa flexível e moldado ao processo, tornam a sua utilização cada vez mais atrativa na automatização de pequenos e grandes sistemas industriais.

7.1.1 A Arquitetura interna de um CLP

Visto que um CLP pode ser considerado como um computador, o seu modelo segue de perto o de um sistema computacional. Concretamente, engloba "*hardware*", "*software*", *dados* e *procedimentos*.

Assim, os elementos básicos que constituem o modelo de um CLP são os seguintes:

a) Unidade Central de Processamento (CPU);
b) Sistema Operativo;
c) Memória de programa e de dados;
d) Entradas (*Inputs*) e saídas (*Outputs*);
e) Comunicações;
f) Alimentação.

A Figura 7.1: A arquitetura básica que representa o modelo lógico de um CLP.

A CPU é o elemento central do CLP e é responsável pela leitura das entradas e pelo acionamento das saídas, de acordo com a lógica definida no programa.

A CPU é ainda responsável pela realização das operações matemáticas e lógicas, bem como gerir temporizadores, contadores e outras funções especiais, e efetuar o diagnóstico dos defeitos que possam ocorrer internamente.

As funções de programação, depuração e testes são executadas pela interface de programação,

Os componentes responsáveis pelo processamento de informação são chamados a intervir tanto na fase de *exploração* como de *programação* e *testes*.

Na fase de exploração tratam *dados* ambientais com origem em sensores e outros dispositivos de entrada, e *dados* armazenados internamente, como por exemplo, variáveis de estado, temporizações, contagens. Desse processamento, executado de acordo com o "*software*' *de aplicação", que é* gerido pelo *sistema operacional*, resultam dados a serem enviados para o ambiente e/ou a armazenar internamente.

Durante a fase de programação, é função dos recursos de processamento tratar e armazenar o "*software*" de aplicação.

As funções de comunicação permitem a troca de dados de um CLP com outros sistemas computacionais. Na fase de programação, as funções de comunicação permitem que um CLP se comunique com as interfaces de programação.

A interface permite ao programador desenvolver e implementar o software de programação, garantindo que outros profissionais se utilizem desse recurso durante todo o ciclo de vida do software.

O ciclo de um software pode ser determinado de acordo com:

1. Especificação;
2. Projeto;
3. Implementação;
4. Teste;
5. Implantação;
6. Manutenção.

Dependendo do tipo de CLP, podem existir portas seriais (RS 232 e RS 485), redes de campo (CAN, *profibus*, *Interbus*, etc.), *ethernet* (TCP/IP), etc.

São essas as funções que permitem ao operador (ou utilizador) do sistema solicitar determinados serviços e obter informações relativas ao estado do sistema controlado.

Os circuitos de entradas/saídas permitem a integração do CLP no seu ambiente de trabalho. As entradas asseguram a ligação entre os dispositivos que fornecem informação do sistema tais como sensores, botões de pressão, interruptores, fim de curso, interruptores e detectores de proximidade, entre outros.

Toda esta informação é processada pela CPU, seguindo as instruções do programa existente na memória do CLP, sendo enviados para as saídas os resultados de processamento para que seja acionada a parte ativa do sistema (atuadores).

As saídas do CLP, realizadas a relés, transistores ou TRIAC´s são, geralmente, do tipo "tudo ou nada" (digitais) e comportam-se como interruptores que podem ligar/desligar bobinas de contactores, relés ou eletro-válvulas, lâmpadas de sinalização, além de outros mais.

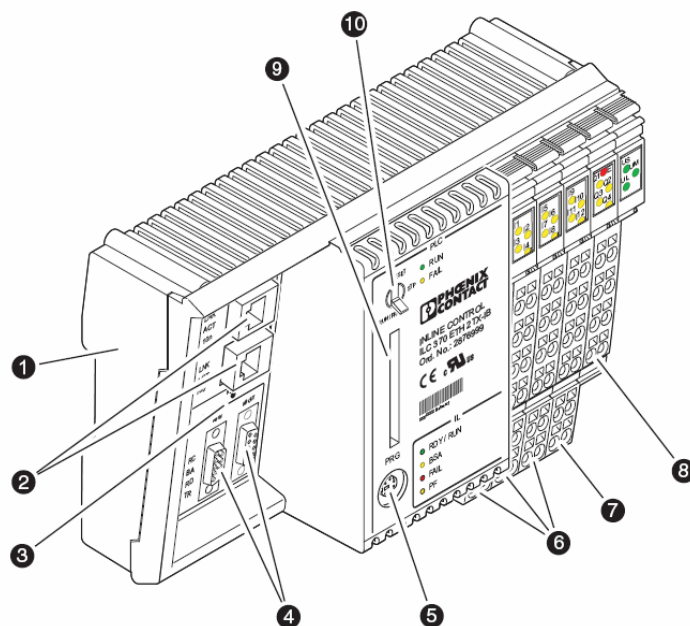



Figura 7.2- Vista frontal de um CLP ILC 390 (Phoenix Contact) e seus principais componentes:

1 Base Eletrônica;
2 Conexão com a rede;
3 Botão de Resset;
4 Conexão com a rede INTERBUS (rede controle) (*higher-level* INTERBUS);
5 Interface RS-232;
6 Conectores 1 to 3: Terminal de entrada de pontos;
7 Conector 4: Terminal de Saídas;
8 Conector 5: Terminal pontos para tensão alimentação;
9 *Card Holder* para Cartão de memória de parametrização;
10 Seletor de modo de operação.

7.1.2 Funcionamento de um CLP.

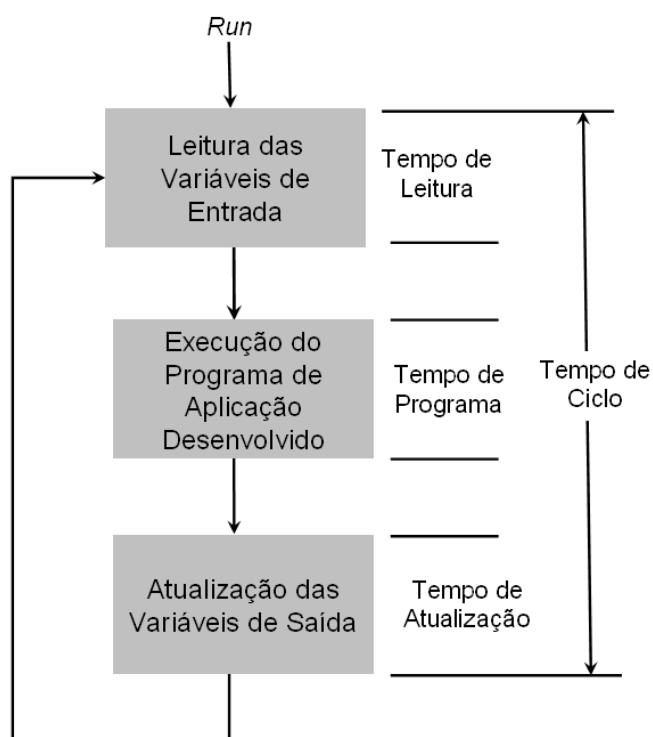
Os CLP´s têm como função a execução cíclica de uma determinada seqüência de instruções.
As fases mais importantes desta seqüência são as seguintes:

Fase 1: Leitura das Variáveis de Entrada – Os sensores colocados no ambiente (instalação, máquina, etc.) transformam grandezas físicas (velocidade, posição, movimento, pressão, temperatura, etc.) em sinais elétricos normalizados, que são enviados para o CLP através das entradas e armazenados na sua memória de dados. Estes dados permanecem inalterados até que esta etapa seja novamente executada.

Fase 2: Execução do Programa de Aplicação – Nesta fase, o CLP tendo em consideração o programa existente em memória de programa e as informações existentes na memória de dados, executa o programa, seguindo instrução a instrução, pela ordem porque foram escritas.

As instruções poderão ser muito diversas – variam de CLP para CLP, mas compreende tipicamente operações lógicas, transferência de dados entre zonas de memória, temporizações e contagens. Podem existir também procedimentos mais elaborados, tais como a criação de mensagens que devem ser enviadas para outros equipamentos através dos recursos de comunicação.

Fase 3: Atualização das Variáveis de Saída – No final de cada varredura do programa (*scan*), são transferidos para as saídas os valores das variáveis de saída, resultantes da execução do programa e que estão contidos na memória de dados. Estas variáveis são atualizadas e o CLP passa ao ciclo seguinte.

As saídas permitem o acionamento dos atuadores (motores, cilindros, etc.) existentes no sistema controlado pelo CLP.

A Figura 7.3 ilustra a execução cíclica de um programa num CLP.

7.2 A Interface Homem-Máquina - IHM

A interface homem-máquina IHM (*MMI* – "*Man-Machine Interface*" ou *HMI* – *Human-Machine Interface*') tem como principal função, fornecer todas as informações essenciais e permitir a operação de todo o sistema ao operador de uma célula automática de manufatura.
Segundo Castrucci e Moraes, (2001), IHM são sistemas que surgiram da necessidade de uma interface amigável, eficiente e ergonômica entre sistemas de automação complexos e a equipe encarregada da sua operação.
Uma interface homem-máquina, pode ser simplesmente um conjunto de botoeiras e/ou sinalizadores luminosos, *displays*, entre outros.
As interfaces mais recentes utilizam "*displays*" do tipo "*touch-screen", o* que permite a construção do ambiente gráfico desejado, no qual é possível a configuração, monitoração do processo em execução, alteração de determinados parâmetros do sistema como: temporizações e contagens, operações e movimentação em modo manual.
Portanto, as IHM's devem ser construídas tendo os operadores como usuário final e representar o processo real. Dependendo de seus recursos, as IHM's podem ser usadas como interface de programação.
Ainda, segundo Castrucci e Moraes, (2001), operam em dois modos distintos:

Modo de desenvolvimento: Onde são realizadas a criação de telas gráficas e animações representativas do processo;

Modo "*Run Time*": A execução da janela animada que mostra o andamento do processo, onde ocorre a interação do operador.

As IHM´s em uma linha de produção de montagem de carrocerias devem trazer telas gráficas interligadas hierarquicamente e compatíveis com a operação do processo.
Um projeto de telas gráficas de visualização de uma IHM em um sistema de automatizado é crítico para a operação de qualquer sistema de manufatura,

pois é a janela do operador para seu estado e controle.
As informações mostradas e sua aparência na tela são dirigidas ao operador e devem ser organizadas e objetivas para um melhor atendimento.
A interfaces de programação para as IHM´s atuais são amigáveis ao programador e possuem recursos avançados, além de linguagem de programação orientada ao objeto, o que tem representado grandes vantagens no desenvolvimento de telas.
Com relação à interconexão dos equipamentos para alimentar um sistema IHM, (REDMAN el aI. -1996) propõe a implementação de programas baseados em objetos distribuídos pela rede para facilitar a integração de novos sistemas aos antigos (sistemas legados) com tecnologias como OPC[2] (OLE for Process Control).
O padrão OPC apresenta-se como uma poderosa ferramenta na automação industrial, pois permite uma configuração simples para o programador das informações que serão transferidas do sistema operacional do CLP para outros ambientes em sistemas superiores como as IHM's e sistemas supervisórios ou MES.
A *OPC Foundation* é um consórcio independente e sem fins lucrativos que congrega mais de 200 fabricantes e fornecedores de soluções para automação industrial em todo o mundo. Sua missão, como se percebe, é assegurar a interoperabilidade entre hardware e software de múltiplos fornecedores na indústria de manufatura.
As principais informações esperadas das IHM´s na linha de manufatura de carrocerias automotivas são descritas a seguir:

a) Diagnósticos de falha;
b) Seleção de modo de trabalho (automático e manual);
c) Ferramentas para operações e movimentações em modo manual;
d) Apresentação de dados quantitativos e qualitativos sobre a produção;

---

[2] *O OPC (OLE for Process Control) é um conjunto padronizado de interfaces, propriedades e métodos voltado para aplicações de controle de processos e automação da manufatura, visando habilitar a comunicação entre diversos dispositivos de monitoramento, independentemente do fabricante ou do software. Os padrões são baseados nas tecnologias da Microsoft: OLE, ActiveX, COM (Component Object Model) e DCOM (Distributed Component Object Model).*

Em alguns casos, dependendo de seus recursos, a IHM pode ser utilizada como ferramenta de programação, da rede, do softare de CLP, e até mesmo como ferramenta de desenvolvimento de telas de IHM.

Seguem abaixo, alguns exemplos de telas de IHM´s utilizadas em células de montagem de carrocerias (Figura 7.4 e 7.5):

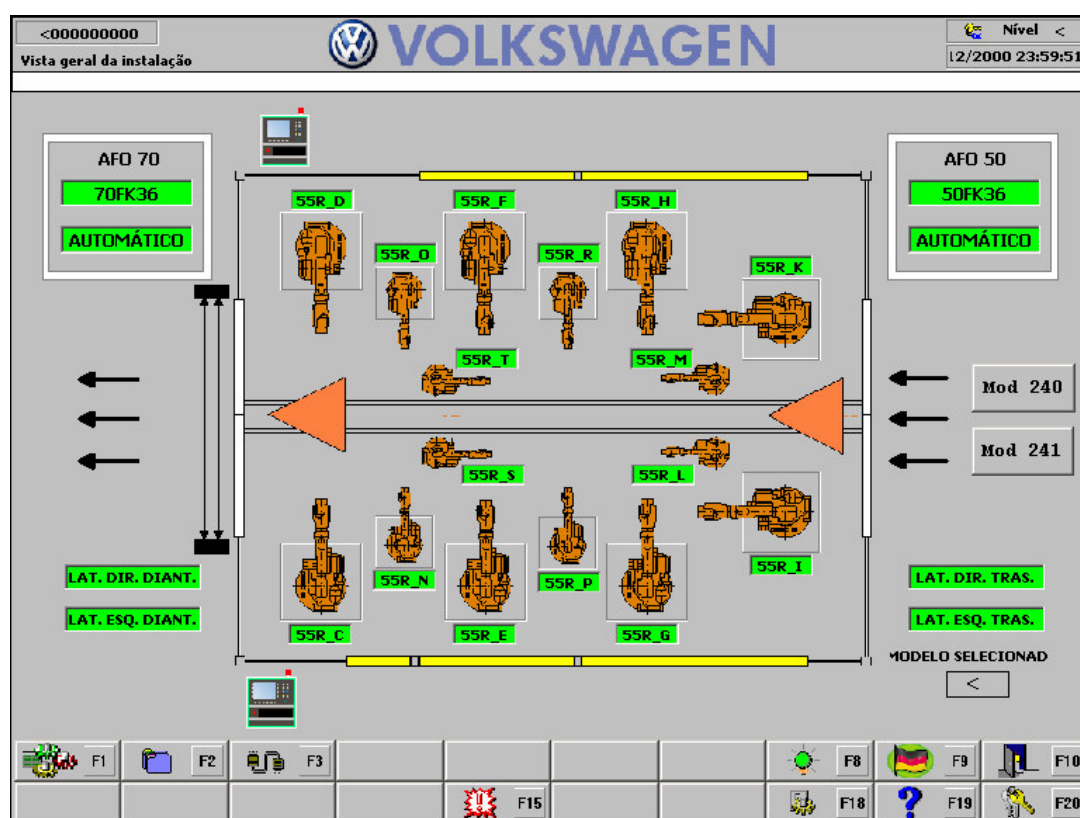



Fig.7.4: Na tela principal, uma visão geral da estação e as principais informações de diagnóstico para o operador.

Fig.7.5.: Tela de movimentação com execução para movimentos em manual e verificação da posição atual dos dispositivos. Também é possível diagnosticar falhas durante a movimentação.

7.3 Tecnologia de Rede de Comunicação para Automação

Ao se conceber uma solução de rede de automação, o primeiro passo é considerar a arquitetura geral da célula organizando seus elementos vitais IHM´s CLP´s e outros, assim como as informações e a performance esperada.

Neste contexto, devem ser consideradas duas topologias principais: A topologia de rede de controle e a de troca de dados com outros sistemas.

Os pontos mais importantes e que deverão ser verificados na escolha da solução de rede a ser adotada são:

a) Quais as distâncias entre os elementos interligados pela rede?
b) Qual o *lay-out* da instalação industrial?
c) Existe necessidade de um sistema de backup? Em que nível do sistema?
d) Quais são as condições ambientais? Existe campo magnético intenso nas proximidades? Existe interferência eletromagnética?
(Esse item merece uma atenção especial, considerando células de montagem de carrocerias com a utilização de solda ponto ou a arco).
e) Os clientes (operadores/manutencistas e engenheiros) estão familiarizados com as novas tecnologias de redes de campo para controle, de compartilhamento e de troca de dados?
f) Quais as necessidades dos dispositivos em relação da velocidade de transmissão de dados?
g) Qual a capacidade de expansão dos módulos prevista para os próximos anos?
h) Existe preferência quanto ao atendimento aos padrões internacionais ou por redes proprietárias?

Os CLP´s são usados para controlar saídas (digitais ou analógicas) de acordo com a leitura de sensores discretos ou digitais assim como os valores dos instrumentos analógicos.

De forma convencional, os sinais de campo são conectados aos cartões de entrada e saída dos CLPs. Os sinais discretos são codificados na faixa de 0 a 24VCC ou 0-110VAC ou 0-220VAC. Já os sinais analógicos são geralmente codificados na faixa de 0 a 20 mA ou de 0-10V.

Outra alternativa é o uso de uma rede digital de instrumentos e sensores.

A Figura 7.6 apresenta um CLP interconectado através de uma rede com módulos entrada e saída.

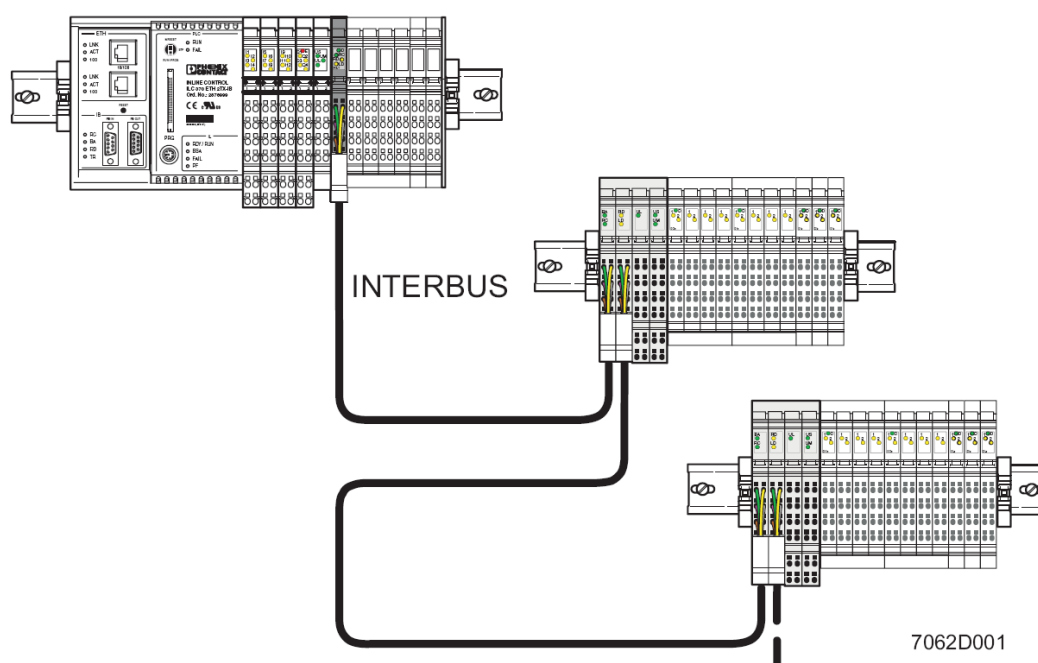



Figura 7.6 - Conexão através da rede entre o CLP e seus módulos de entrada e saída.

Este tipo de rede atende pelo nome genérico de *"fieldbus"* ou barramento de campo, que são divididas em tipos de rede em 3 tipos diferentes:

Redes de sensores ou Sensorbus - são redes apropriadas para interligar sensores e atuadores discretos tais como chaves limites (*limit switches*), contactores, desviadores.
São exemplos de rede Sensorbus: ASI da Siemens, Seriplex, AN e LonWorks;

Redes de Dispositivos ou Devicebus - são redes capazes de interligar dispositivos mais genéricos como CLPs, outras remotas de aquisição de dados e controle, conversores AC/DC, relés de medição inteligentes;
Exemplos:
Profibus-DP, DeviceNet, Interbus-S, SDS, LonWorks, CAN, ControlNet, ModbusPlus.

Redes de instrumentação ou fieldbus - São redes concebidas para integrar instrumentos analógicos no ambiente industrial, como transmissores de vazão, pressão, temperatura, válvulas de controle;
Exemplos:
IECSP50-H1, HART, WorldFIP, Profibus-PA.

Atualmente o "Standard Fieldbus" padroniza 8 famílias de redes (Figura 7.7).

Tipo	Nome Comercial
1	Fieldbus (mesmo que ANS/ISA S50.01)
2	ControlNet
3	Profibus
4	P-NET
5	Fieldbus Foundation HSE
6	SwiftNet
7	WorldFIP
8	Interbus

Figura 7.7 - Standard Fieldbus e as 8 famílias de redes padronizadas:

Existe forte tendência de todas estas redes venham a utilizar a **Ethernet** como plataforma básica num futuro próximo e que adotem forte orientação a objetos através de blocos de função (Figura 7.8).

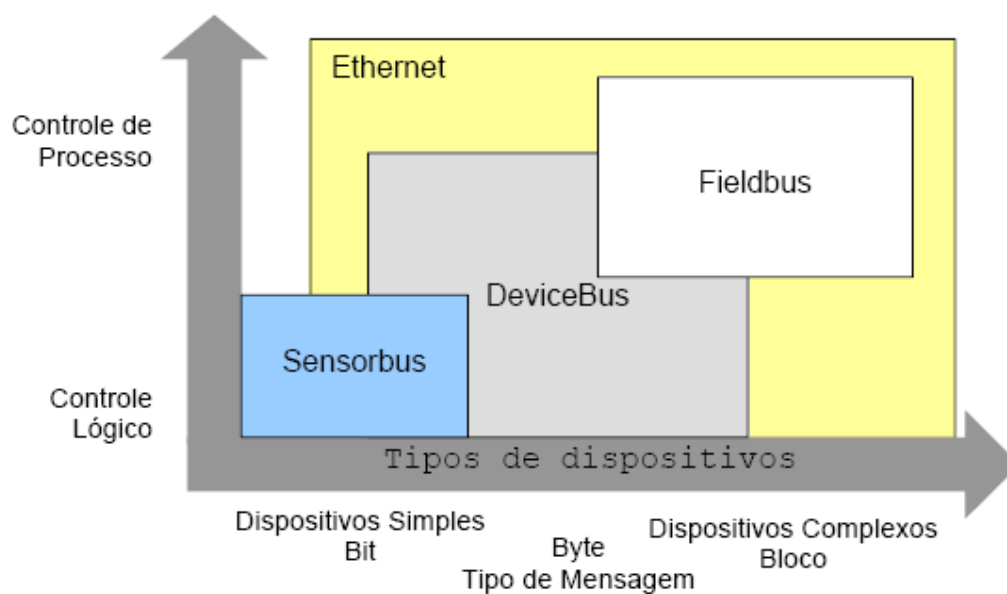



Figura 7.8: Tipos de redes de campo (ARC, 2006).

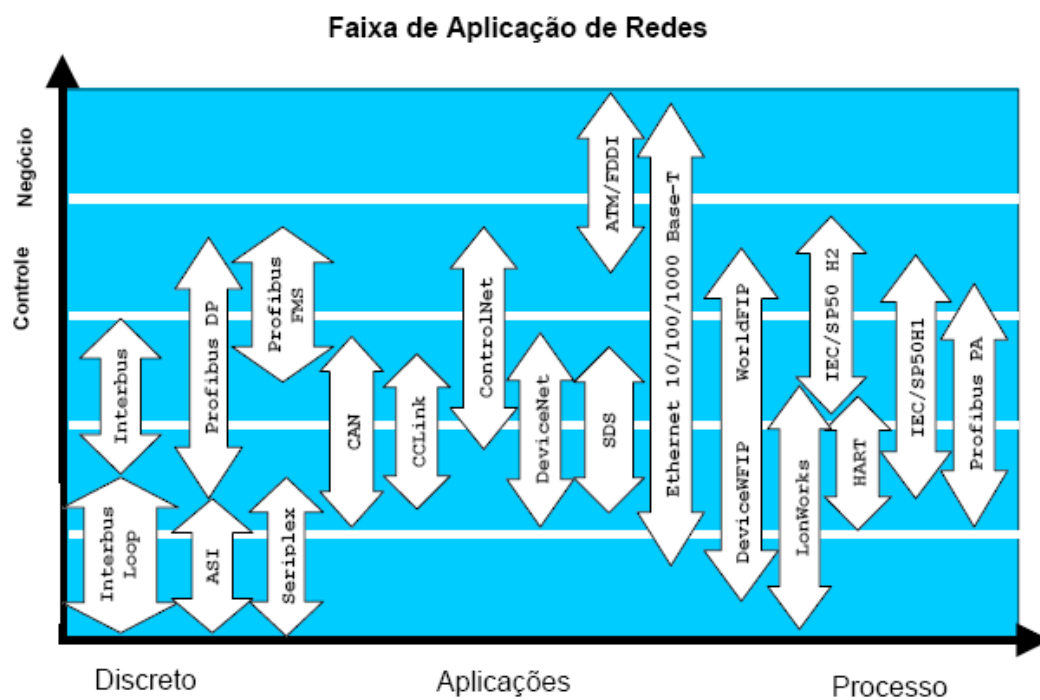



Figura 7.9: Faixa de atuação das redes de campo segundo (ARC, 2006).

As Tabelas 7.1 a e 7.1 b comparam as principais redes de campo quanto às suas características fundamentais.

Tabela 7.1a

Características Físicas						Informação de background			
Rede	Topologia	Meio Físico	Número máximo de dispositivos	Distância Máxima	Velocidade da rede	Desenvolvedor da tecnologia	Ano de Introdução	Standard	Abertura
DeviceNet	Linha tronco / drop line com ramificações	Par trançado para sinal e potência	64 nodos	500m	500kbps, 250 kbps, 125 kbps	Allen-Bradley	1992	ISO 11898 & 11519	6 forn. chip 500+ produtos
SDS	Linha tronco/ drop line	Par trançado para sinal e potência	64 nodos 126 endereços	500m	1 Mbps, 500 kbps, 250 kbps, 125 kbps	Honeywell	1997	Especificação Honeywell submetida ao IEC, ISO11989	6 forn chip 200+ produtos
Profibus	Linha, estrela e anel	Par trançado ou fibra	127 nodos	24 Km (fibra)	DP até 12 Mbps PA 31.25 Kbps	PTO/Siemens	1995	DIN 19245 part 3/4	Produtos de >150 fornec.
LonWorks	Bus, anael, loop, estrela	Par trançado, fibra, linha de alimentação.	32000 nodos/domínio	2000m@ 78 kbps	1.25Mps full duplex	Echelon Corp.	1992-1996	ASHRAE do BACnet	Documentação do protocolo pública
Asi	Bus, anel, árvore de estrela	Cabo de dois fios	31 escravos	100 metros, 300 com repetidor	167 kbps	AS-I Consortium	1984	Submetido ao IEC	1 chip fornc. documentação pública
CANopen	Linha tronco/dropline	Par trançado para sinal e potência	64 nodos	500 metros	1Mbps, 500kbps, 250kbps, 125kbps	Philips/CiA	Março 1994	CIA	6 fornec. chips 100+ produtos
ControlNet	Linha tronco, estela, árvorePar trançado	Coax R6/U, fibra	99 nodos	5Km coax, 30Km + fibra	5Mbps	Allen-Bradley	Jan 1994	ControlNet International	Chips da AB, vários produtos
FiledBus Foundation	Multidrop com dispositivos alimentados pelo barramento	Par trançado	240/segmento, 65000 segmentos	1900m@31.25K 500m@2.5M	31.25 kbps 1Mbps .5 Mbps	Fielbus Foundation	DP - 1994 PA - 1995	ISA SP50/IEC TC65	Chip/Sw de vários fornec.
!EC/ISA SP50 Fieldbus	Estrela ou barramento	Par trançado, fibra e rádio	IS 3-7 não IS 128	1700m@31.25K 500M@5Mbps	31.25 kbps IS + 1, 2.6/5 Mbps	ISA&Fieldbus F.	March 1991	IEC 1158/ANSI 850	Vários fornec. chip
InterBus	Segmentada com drops em T	Par trançado, fibra e anel	256 nodos	400m/segmento 12.8Km total	500 kBits/s, full duplex	Phoenix Contact	Outono 1993	DIN 19258	Produtos de 400+ fornecedores

Tabela 7.1b

Características Físicas						Informação de background			
Rede	**Topologia**	**Meio Físico**	**Número máximo de dispositivos**	**Distância Máxima**	**Velocidade da rede**	**Desenvolvedor da tecnologia**	**Ano de Introdução**	**Standard**	**Abertura**
DeviceNet	Linha tronco / drop line com ramificações	Par trançado para sinal e potência	64 nodos	500m	500kbps, 250 kbps, 125 kbps	Allen-Bradley	1992	ISO 11898 & 11519	6 forn. chip 500+ produtos
SDS	Linha tronco/ drop line	Par trançado para sinal e potência	64 nodos 126 endereços	500m	1 Mbps, 500 kbps, 250 kbps, 125 kbps	Honeywell	1997	Especificação Honeywell submetida ao IEC, ISO11989	6 forn chip 200+ produtos
Profibus	Linha, estrela e anel	Par trançado ou fibra	127 nodos	24 Km (fibra)	DP até 12 Mbps PA 31.25 Kbps	PTO/Siemens	1995	DIN 19245 part 3/4	Produtos de >150 fornec.
LonWorks	Bus, anael, loop, estrela	Par trançado, fibra, linha de alimentação.	32000 nodos/domínio	2000m@ 78 kbps	1.25Mps full duplex	Echelon Corp.	1992-1996	ASHRAE do BACnet	Documentação do protocolo pública
Asi	Bus, anel, árvore de estrela	Cabo de dois fios	31 escravos	100 metros, 300 com repetidor	167 kbps	AS-I Consortium	1984	Submetido ao IEC	1 chip fornc. documentação pública
CANopen	Linha tronco/dropline	Par trançado para sinal e potência	64 nodos	500 metros	1Mbps, 500kbps, 250kbps, 125kbps	Philips/CiA	Março 1994	CIA	6 fornec. chips 100+ produtos
ControlNet	Linha tronco, estela, árvorePar trançado	Coax R6/U, fibra	99 nodos	5Km coax, 30Km + fibra	5Mbps	Allen-Bradley	Jan 1994	ControlNet International	Chips da AB, vários produtos
FiledBus Foundation	Multidrop com dispositivos alimentados pelo barramento	Par trançado	240/segmento, 65000 segmentos	1900m@31.25K 500m@2.5M	31.25 kbps 1Mbps .5 Mbps	Fielbus Foundation	DP - 1994 PA - 1995	ISA SP50/IEC TC65	Chip/Sw de vários fornec.
!EC/ISA SP50 Fieldbus	Estrela ou barramento	Par trançado, fibra e rádio	IS 3-7 não IS 128	1700m@31.25K 500M@5Mbps	31.25 kbps IS + 1, 2.6/5 Mbps	ISA&Fieldbus F.	March 1991	IEC 1158/ANSI 850	Vários fornec. chip
InterBus	Segmentada com drops em T	Par trançado, fibra e anel	256 nodos	400m/segmento 12.8Km total	500 kBits/s, full duplex	Phoenix Contact	Outono 1993	DIN 19258	Produtos de 400+ fornecedores

Uma das arquiteturas de rede mais praticadas é a que define duas hierarquias de redes: rede de troca dados com outros sistemas e células e rede de controle.

Pode-se observar a arquitetura adotada no recente projeto em células de montagem de carrocerias na VW do Brasil (Figura 7.7).

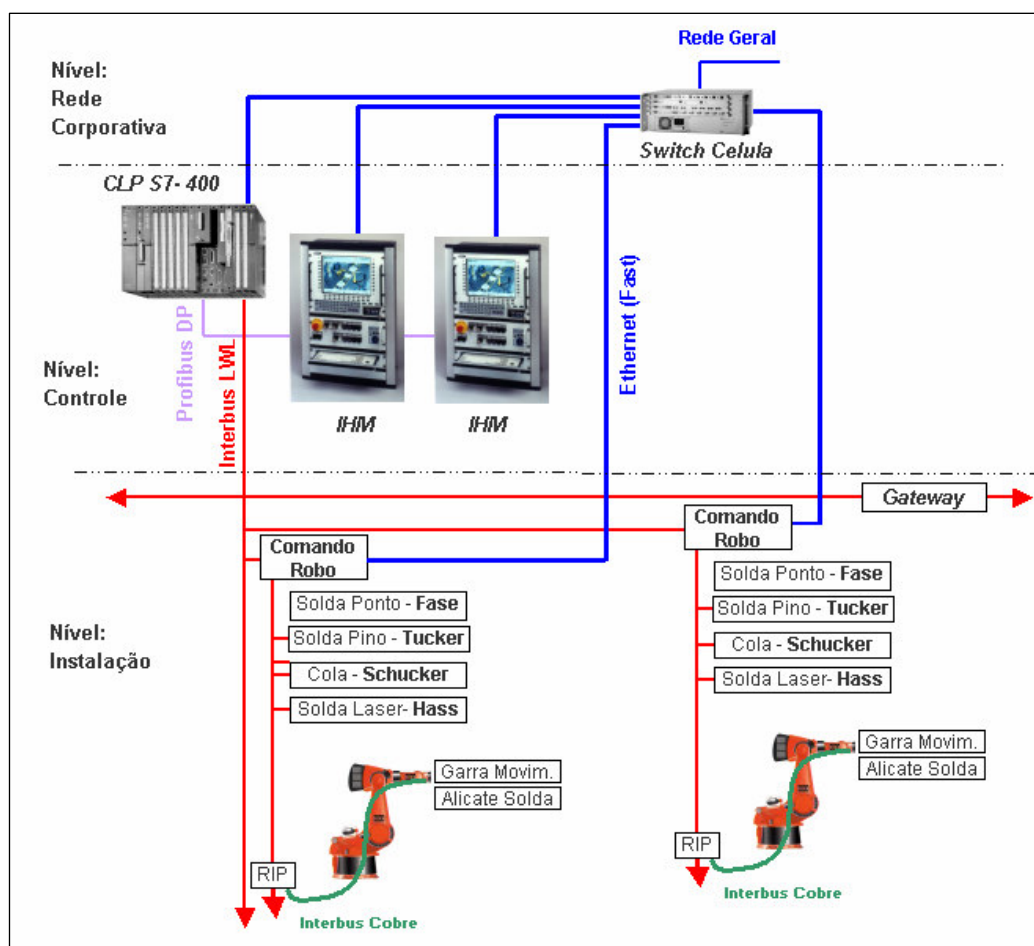



Fig. 7.10 A arquitetura do sistema de automação de uma estação automática de soldagem. Há duas arquiteturas de rede principais: Rede de controle Interbus (vermelho), e a rede de dados Ethernet (azul) utilizada para troca de dados com sistemas superiores.

7.4 Modelagem e Implementação de um Sistema de Controle.

De acordo com MIYAGI (1996), há uma descrição da metodologia para o projeto de controle de sistemas produtivos. Esta metodologia é baseada em procedimentos que direcionam a tarefa de desenvolvimento de "*software*" em engenharia da computação (PRESSMAN, 1992). Neste sentido, é introduzido o conceito de ciclo de vida do sistema de controle de acordo com a Fig. 7.8.

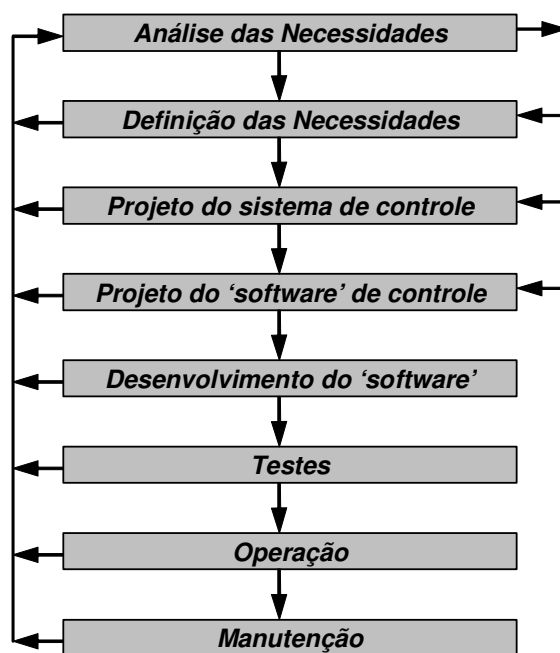



Fig. 7.11Ciclo de vida de um sistema de controle

A realização de cada uma das etapas de desenvolvimento do sistema envolve o conceito de prototipagem, repetindo-se ciclicamente o procedimento descrito na Figura 7.9. Desta forma, é possível tratar as dificuldades existentes em sistemas que apresentam maior complexidade, tanto estrutural quanto comportamental e refinar, gradativamente, os modelos para se obter um nível de fidelidade adequado.

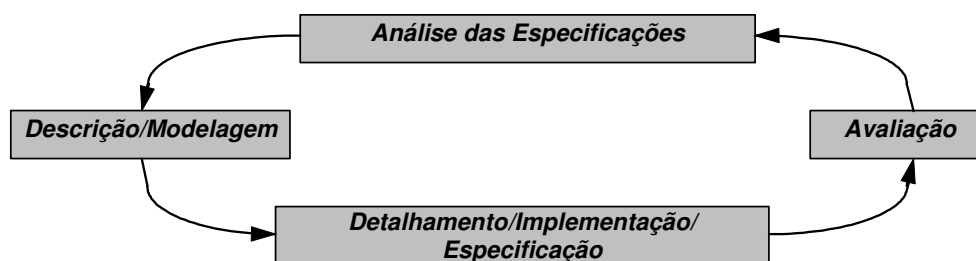



Fig. 7.12 Ciclo de Prototipagem.

Como pontos de partida para a modelagem, devem ser analisadas as necessidade e especificações.

A seguir, são apresentadas as necessidades e especificações para a automação da célula LGG (*LASER Gross Geo*), célula de soldagem LASER e aplicação da geometria para as carrocerias da família de veículos VW 24x.

a) Aplicação de 3100 mm de cordão de solda no teto com adição de material;

b) Aplicação de 3580 mm de cordão de solda sem adição de material;

c) Atender a produção de 600 carrocerias por dia sendo 3 modelos de carros;

d) Operar aproximadamente 290 dispositivos pneumáticos para o correto posicionamento das partes da carroceria que serão soldadas;

e) Possuir disponibilidade de 85%. Atender um tempo de ciclo de aproximadamente 75 seg.

Em relação à disponibilidade, apresentado no item (e), é definido, segundo Johnson (1989) no gráfico a seguir (Figura 7.8), onde é apresentada sua relação com a manutenabilidade e a confiabilidade.

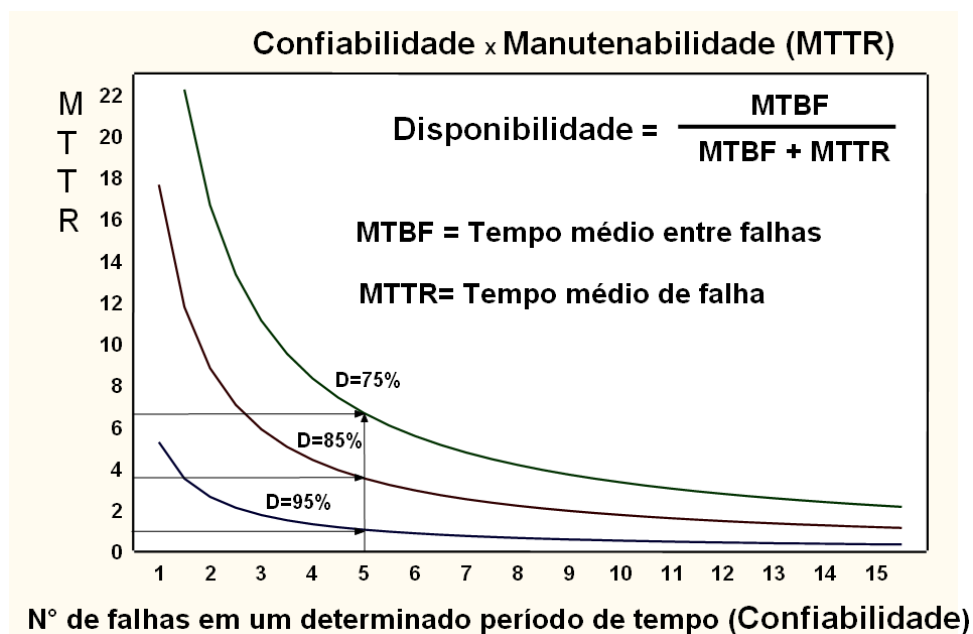



Fig. 7.13 Reduzindo o tempo para sanar as falhas e o número de paradas indesejáveis, é possível incrementar a disponibilidade (Johnson, 1989).

Devido à importância dada à disponibilidade das células automáticas já nas etapas de definição das necessidades e especificações, é necessário prever uma eficiente arquitetura de automação dirigida a um rápido diagnóstico de falhas pelo operador.

Um rápido diagnóstico de falhas associado às ferramentas de atuação para saná-las pode manter o índice de disponibilidade satisfatório numa célula de carrocerias automotivas.

7.4.1 Modelagem e Desenvolvimento de um Software de Programação

A fim de avaliar os métodos avançados de programação para controladores, foram identificadas as seguintes necessidades (FELDMANN, COLOMBO, 1999):

a) Continuidade;
b) Simultaneidade;
c) Eficiência;
d) Clareza;
e) Complexidade;
f) Validação;
g) Flexibilidade.

A qualidade da programação do software de CLP influenciará na performance das células de manufatura em relação ao:

a) Tempo e facilidade para "s*tart-up"*;
b) Tempo de ciclo de processo;
c) Tempo e facilidade de manutenção do software;
d) Diagnóstico de falhas;
e) Tempo e facilidade para realizar modificações e implementação.

Van der Wal (2004) apresentou sete passos para uma correta estruturação do programa de CLP:

1. Identificação das necessidades de interfaces externas do controlador com outros equipamentos no sistema.

2. Definição das trocas principais de sinais entre o controlador e a planta.

3. Definição das interações do operador com o sistema, informações necessárias, ações de controle através das interfaces de IHM e de dados para o sistema de supervisão.

4. Análise dos problemas de controle de cima para baixo (*top-down*) quebrando-os em partições lógicas;

5. Definição dos blocos funcionais necessários.

6. Definição dos tempos de ciclo (*scan*) exigidos pelas diferentes partes da aplicação.

7. Configuração do sistema através da definição dos recursos, conexão dos programas com as entradas e saídas físicas e associação dos programas e blocos funcionais com as tarefas.

A norma IEC 61131-3 (vide capítulo 8) oferece suporte, especialmente, aos últimos 4 passos apresentados, onde ocorre a transição da modelagem para o software.

Além dos sete passos, há alguns princípios gerais que devem ser usados para a otimização d o método de estruturação:

a) Não é recomendado utilizar endereçamento absoluto. Trabalhar com endereçamento simbólico traz vantagens: em caso de modificações ou adaptações de endereçamento haverá um ambiente adequado às mudanças, além de possibilitar a reutilização do código em outras instalações;

b) Não utilizar *jump´s: m*elhor transparência em futuras modificações, depuração de erro e manutenção.

c) Nomear os blocos de função e as rotinas com a descrição de sua função no sistema e ou na instalação: novamente, melhor transparência em futuras modificações, depuração de erro e manutenção.

7.4.2 A Simulação como Ferramenta de Modelagem e Validação do Software de Programação

Como ferramenta utilizada para modelagem e validação da lógica do software de programação do CLP durante a fase de implantação, é esperado que se utilize do aplicativo de simulação (Fig 7.11). Neste exemplo, é apresentado o S7-PLC SIM ferramenta de simulação da SIEMENS para os CLP´s da família S7.

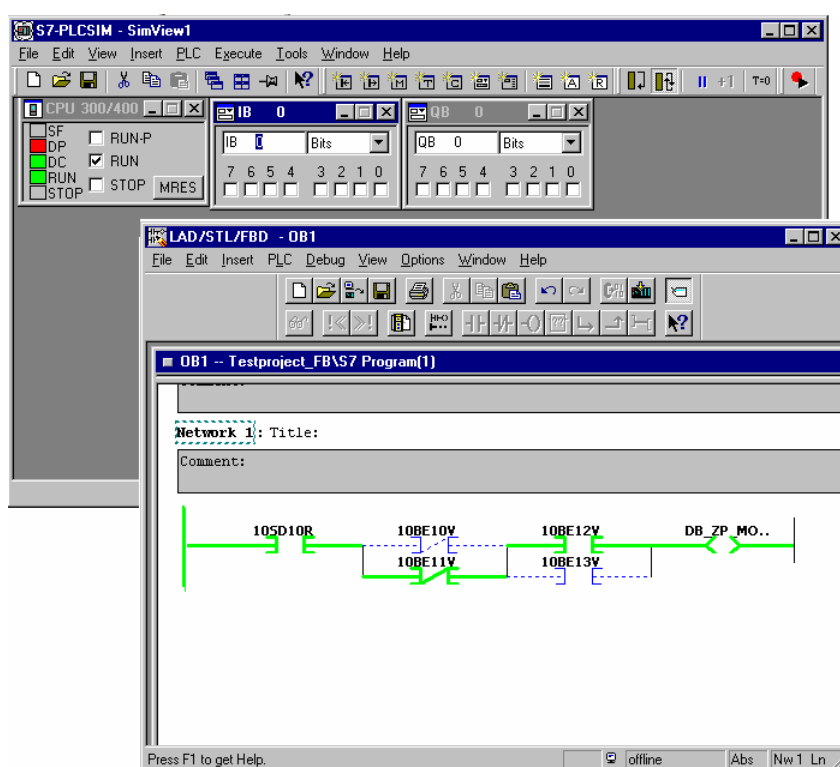



Figura 7.14: A utilização do software. Esta ferramenta pode ser utilizada para a validação da lógica do programa de CLP. Neste exemplo é apresentado o aplicativo S7-PLC SIM.

Uma tendência em matéria modelagem e simulação do programa de CLP é a utilização de aplicações que integram a simulação da lógica do CLP com as ferramentas de simulação da célula, em uma única ferramenta de simulação.

Esta ferramenta proporciona grandes vantagens durante a fase da modelagem, proporcionando a integração dos principais elementos numa célula de montagem de carrocerias automotivas ainda na fase de modelagem. O produto final do uso desta

ferramenta é o software de programação do CLP depurado e testado antes mesmo da fase de *start-up*.

Na figura 7.15 a seguir apresenta-se um exemplo de utilização desta ferramenta.

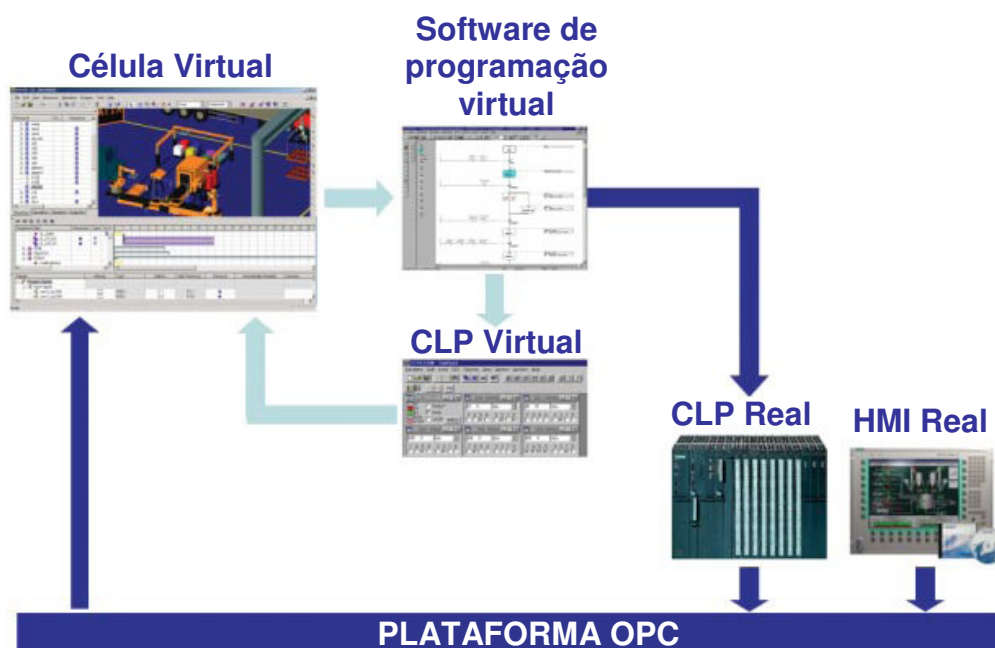



Figura 7.15. Ferramenta de modelagem e simulação do programa de CLP integrado com a ferramenta de simulação da célula de montagem de carrocerias. A integração do simulador da célula com o simulador do CLP.

8 A NORMA IEC 61131-3 COMENTADA

Com o intuito de criar padrões para o controle industrial, a IEC (*International Electrotechnical Commission*) criou a norma intitulada IEC 61131 que, na verdade, é a última versão de um agrupamento de várias normas que estão sendo desenvolvidas ao longo dos anos. Possui a seguinte divisão de acordo com a tabela 8.1:

Tabela 8.1: Divisões da norma IEC 61131

Parte	**Título**	**Conteúdo**	**Publicação**
Parte 1	Visão Geral	Definição da terminologia e conceitos.	2003 (2ª Ed.)
Parte 2	Exigências do Hardware e testes	Teste de verificação e fabricação eletrônica e mecânica.	2003(2ª Ed.)
Parte 3	Linguagens de Programação	Estrutura do software do CP, linguagens e execução de programas.	2003 (2ª Ed.)
Parte 4	Diretrizes ao Usuário	Orientações para seleção, instalação e manutenção de CPs.	2004 (2ª Ed.)
Parte 5	Comunicação	Funcionalidades para comunicação com outros dispositivos.	2000 (1ª Ed.)
Parte 6	Reservada[3]		
Parte 7	Programação de Controle Fuzzy	Funcionalidades de software, incluindo blocos funcionais padrões para tratamento de lógica nebulosa dentro de CPs.	2000 (1ª Ed.)
Parte 8	Orientação para a aplicação e implementação dea linguagens de programação	Orientações para implementação das linguagens IEC 61131-3.	2003 (2ª Ed.)

[3] *A parte 6 da norma foi prevista, inicialmente, para Comunicação via Fieldbus, aguardando a aprovação da norma IEC 61158 que estava em elaboração. Entretanto, após a aprovação da norma 61158, definindo 8 padrões de rede Fieldbus, a IEC decidiu cancelar o desenvolvimento da parte 6, deixando-a reservada para uso futuro.*

Entre as subdivisões desta norma, destaca-se a terceira parte: A IEC 61131-3, que será evidenciada neste trabalho, merece um considerável destaque, pois é o primeiro esforço para a padronização das linguagens de programação para a automação industrial. Este trabalho abordará a parte 3 da norma, porém, as demais partes são importantes para auxiliar os usuários na aplicação dos CLP´s de forma mais adequada.

Hoje, a IEC-61131-3 é a única norma mundial para linguagens de controladores programáveis industriais.

Na Figura 8.1, observa-se o histórico do esforço da IEC com relação a esta norma.

A norma busca dar harmonia à forma como são projetados e operados os controladores industriais, padronizando a interface de programação.

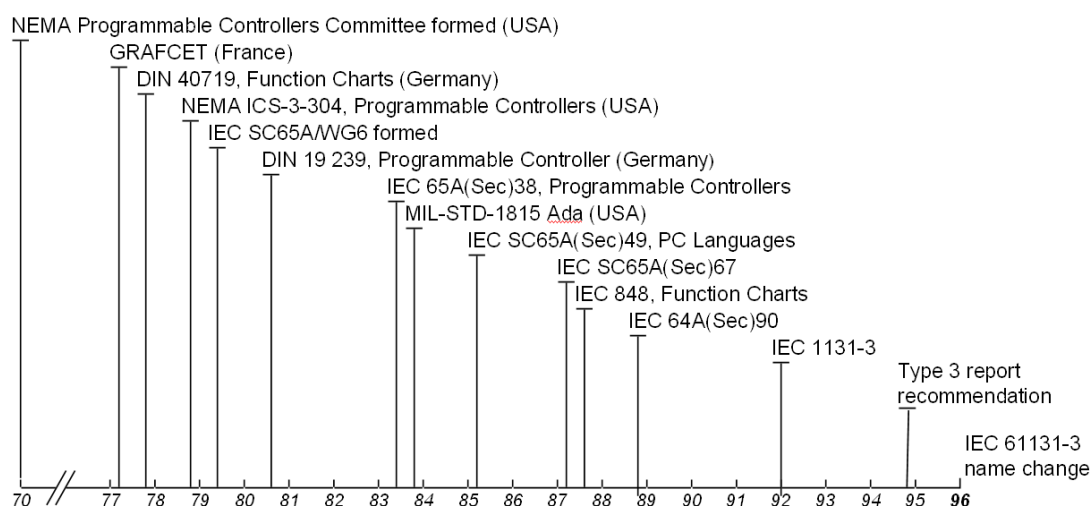



Figura 8.1 - O histórico da norma IEC 61131-3.

Todas as partes aderem a uma estrutura comum e funcionam juntas de forma harmoniosa.

É importante ressaltar que as normas IEC são de âmbito mundial e são isentas e independentes de qualquer empresa.

Suas principais características são:

- A norma é um resultado da Força Tarefa 3, Linguagens de Programação, dentro do IEC TC65 SC65B.
- Originou-se do trabalho de sete empresas internacionais somando dezenas de anos de experiência no campo da automação industrial.
- A norma completa reúne, aproximadamente, 200 páginas de texto com 60 tabelas (incluindo tabelas de características).
- A especificação da sintaxe e semântica de linguagens de programação vigentes, incluindo o modelo geral de software e uma linguagem de estruturação.

A norma pode ser dividida em duas partes:

1. Elementos Comuns (*Common Elements*);
2. Linguagens e programação (*Programming Languages*).

8.1 Elementos Comuns

8.1.1 Tipagem de Dados

Dentro dos elementos comuns, os tipos de dados são definidos. A tipagem de dados previne erros na fase inicial. É usada para definição do tipo de qualquer parâmetro usado. Isto evita, por exemplo, a divisão de uma data por um inteiro. Os tipos de dados comuns são:

- Boolean,
- Integer,
- Real,
- Byte
- Word,
- Date,
- Time_of_Day.
- String

Baseado nisto, é possível definir outros tipos de dados derivados destes, conforme a necessidade do projeto. Desta forma, pode-se definir por exemplo uma entrada analógica como tipo de dado e reutilizá-la inúmeras vezes.

8.1.2 Variáveis

Variáveis são associadas somente para endereços explícitos de hardware nas configurações(entradas e saídas, por exemplo), recursos e programas. Desta forma, cria-se um alto nível de independência do hardware, proporcionando a reutilização do software.

O escopo das variáveis é normalmente limitado à unidade de organização nas quais elas são declaradas (escopo local).

Isto significa que os nomes delas podem ser reutilizados em outras partes sem nenhum conflito, eliminando outra fonte de erros muito comum que são os dados

corrompidos pelo programa. Se as variáveis tiverem escopo global, estas devem ser declaradas como tal (VAR_GLOBAL).

A cada parâmetro pode ser atribuído um valor inicial na partida a quente (onde os estados das variáveis são mantidos deste do último desligamento) e a frio do sistema (onde todas as variáveis assumem um valor inicial), de forma a garantir os valores corretos.

8.1.3 Configuração, Recursos e Tarefas

Para melhor entendimento, observa-se o modelo de software, como definido pela norma (Figura 8.2):

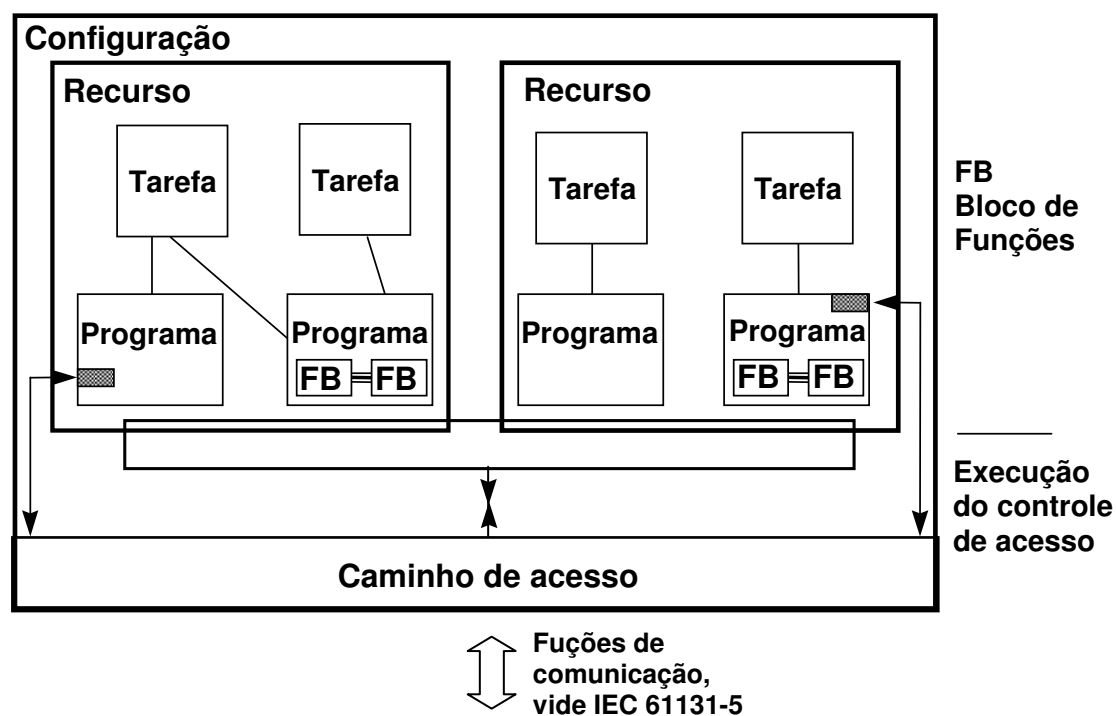



Figura 8.2: Modelo de software, conforme definido pela norma.

Hierarquicamente, a norma prevê a estruturação do programa. No nível mais alto, o software deve definir a estrutura principal para um sistema de controle específico que pode ser formulado através de Configuração (*Configuration*). Uma configuração é específica para um sistema de controle, incluindo a disposição e composição do

hardware, recursos de processamento, endereçamento de memória para entradas e saídas (I/O), interfaces de comunicação e demais capacidades do sistema.

Dentro da configuração, pode-se definir um ou mais recursos (*Resources*). Entende-se um recurso como sendo um elemento com capacidade de processamento dos programas em linguagens estruturadas previstas pela IEC.

Dentro do recurso, uma ou mais tarefas (*Tasks*) podem ser definidas. Sabe-se que as tarefas controlam a execução de um conjunto de programas ou blocos funcionais. Elas podem ser executadas periodicamente ou quando houver a ocorrência de um evento específico, tal como uma mudança de variável.

Programas (Programs) são constituídos de um número de diferentes elementos escritos usando qualquer uma das linguagens definidas pela IEC. Tipicamente, um programa consiste de uma rede de Funções (Functions) e Blocos Funcionais (Function Blocks), os quais são capazes de trocar dados.

Funções e Blocos Funcionais são os blocos básicos de construção, contendo uma estrutura de dados e um algoritmo.

A proposta da IEC 61131-3 é proporcionar maior recurso e capacidade ao software de interface para programação.

Tornando-o aberto para futuras inserções como por exemplo multi-processamento e programas disparados por eventos.

A IEC 61131-3 é apropriada para uma ampla faixa de aplicações na industria inclusive na industria automobilística.

8.2 Unidades de Organização de Programas

Na IEC 61131-3, os Programas, Blocos Funcionais e Funções são chamadas de Unidades de Organização de Programas (POUs).

8.2.1 Funções

A IEC definiu funções padrões e funções definidas pelos usuários.
Funções padrões são, por exemplo, ADD (ition), ABS (absolute), SQRT, SINus e COSinus.
Funções definidas pelo usuário, uma vez definidas, podem ser usadas inúmeras vezes.

8.2.2 Blocos Funcionais – FBs

Blocos Funcionais são equivalentes aos circuitos integrados, CIs, representando uma função de controle especializada. Estes contêm dados e um algoritmo, de modo que preservam os estados passados (uma das principais diferenças das Funções). Possuem também uma interface bem definida e escondem o seu conteúdo, tais como os CIs. Desta forma, os FBs proporcionam uma separação clara entre diferentes níveis de programadores e equipes de manutenção.

Uma malha de temperatura (PID) é um excelente exemplo de Bloco Funcional. Uma vez definido, o bloco pode ser usado inúmeras vezes, no mesmo programa, diferentes programas, ou mesmo diferentes projetos, tornando-o altamente reutilizável.
Blocos Funcionais podem ser escritos em qualquer uma das linguagens IEC, e em muitos casos, até mesmo na linguagem “C”. Neste sentido, eles podem ser definidos pelo usuário. Blocos Funcionais Derivados são baseados nos FBs padrões.
As interfaces de funções e blocos funcionais são descritas da mesma forma:

```
FUNCTION_BLOCK:Exemplo

VAR_INPUT:
     X :  BOOL;
     Y :  BOOL;
END_VAR

VAR_OUTPUT
     Z :  BOOL;
END_VAR

     (*statements          of          functionblock          body*)

END_FUNCTION_BLOCK
```

Figura 8.3.: Exemplo básico de declaração de um bloco de funções. As declarações acima descrevem a interface para um bloco funcional com dois parâmetros booleanos de entrada e um parâmetro booleano de saída.

8.3 Programas

Com os blocos básicos de construção, anteriormente mencionados, pode-se dizer que um programa é uma rede de Funções e Blocos Funcionais. Um programa pode ser escrito em qualquer uma das linguagens de programação definidas.

Seqüênciamento Gráfico de Funções - SFC.

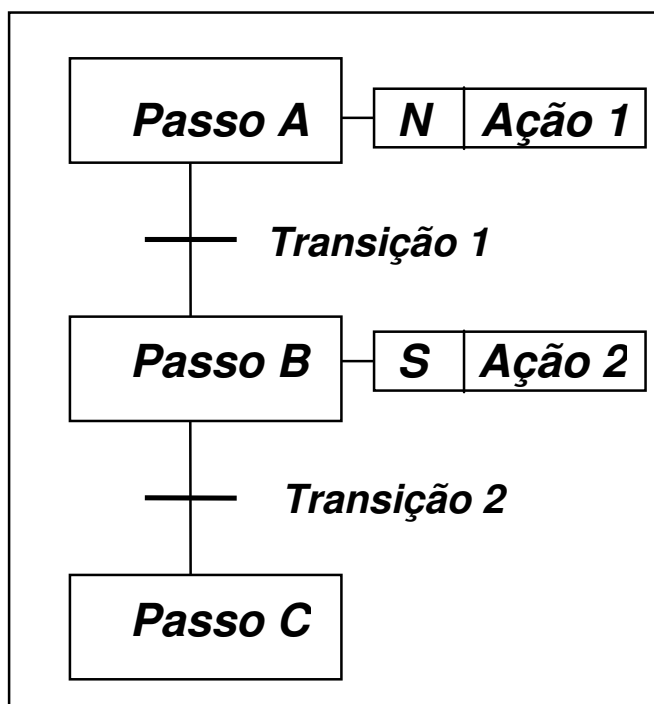



Figura 8.4: Exemplo de seqüência de funções.

Universidades francesas desenvolveram uma linguagem de representação de processos seqüenciais baseada nas Redes de Petri: o Grafcet (*Graphe Fonctionnel de Command Etape Trasition*). Grafcet se tornou um padrão europeu e, em 1988 foi publicado o padrão IEC 848, *Preparation of function charts for control system*, baseado na existente linguagem Grafcet.
A norma IEC 61131-3 introduziu pequenas modificações no padrão IEC 848 visando acoplar esta quinta linguagem às demais linguagens previstos na IEC 1131-3.

O SFC (*Sequential Function Chart*) descreve graficamente o comportamento seqüencial de um programa de controle. É derivado das redes de Petri e da norma IEC 848 Grafcet, com as alterações necessárias para converter a representação de uma

documentação padrão para um conjunto de elementos de controle de execução. As características permitem que a sua utilização, segundo o que está descrito abaixo (R.W. LEWIS, 1999):

- Descrever o comportamento seqüencial de um sistema;
- Como linguagem de estruturação das ações de um programa, segundo um um modelo *top-down*;
- Para descrever o comportamento de um processo seqüencial;
- Para representar as fases de um processo tipo batelada “batch”;
- Para representar um processo de comunicação de dados, etc;

O SFC estrutura a organização interna do programa e ajuda a decompor o problema de controle em partes gerenciáveis enquanto mantém a sua visão geral.
O SFC consiste em *passos*, interligados a blocos de *ações e transições*.
Cada passo representa um estado particular do sistema que esta sendo controlado. Uma transição é associada a uma condição que, sendo verdadeira, causa a desativação do passo anterior e a ativação do passo seguinte.
Os *passos* são ligados com blocos de ações, desempenhando uma determinada ação de controle. Cada elemento pode ser programado em qualquer linguagem prevista na IEC, incluindo o próprio SFC.
É possível o uso de seqüências alternativas e mesmo paralelas, tais como aquelas normalmente usadas em aplicações de bateladas. Por exemplo: uma seqüência é usada para o processo primário, a segunda para a monitoração das restrições operacionais (Figura 8.5).

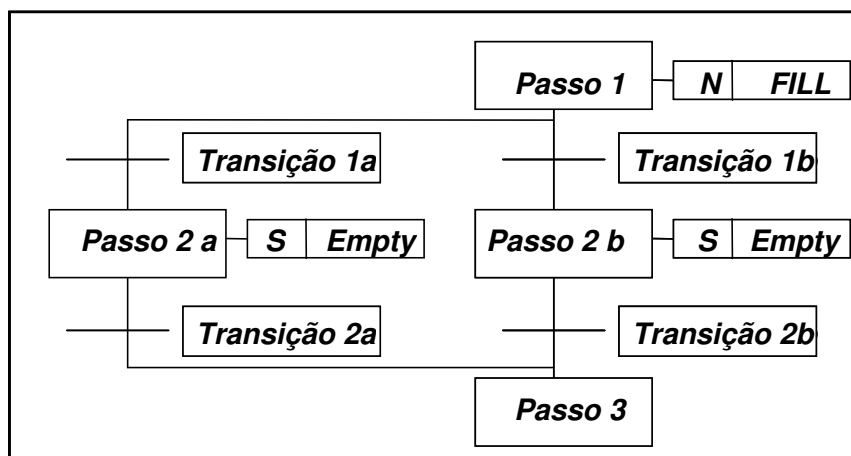



Figura. 8.5.: Exemplo de seqüência de funções alternativas.

Devido a sua estrutura geral, o SFC funciona também como uma ferramenta de comunicação, integrando pessoas de diferentes formações, departamentos e países.

8.4 Linguagens de Programação

São definidas quatro linguagens pela norma. Isto significa que suas sintaxes e semânticas foram definidas, eliminando a chance de dialetos. Uma vez aprendidas, é possível o uso de uma variedade de sistemas baseados nesta norma.
As linguagens consistem em duas textuais e duas gráficas:

a) Textuais:
Lista de Instruções (IL) e Texto Estruturado (ST).
b) Gráficas:
Diagrama *Ladder* (LD) e Diagrama de Blocos Funcionais (FBD).

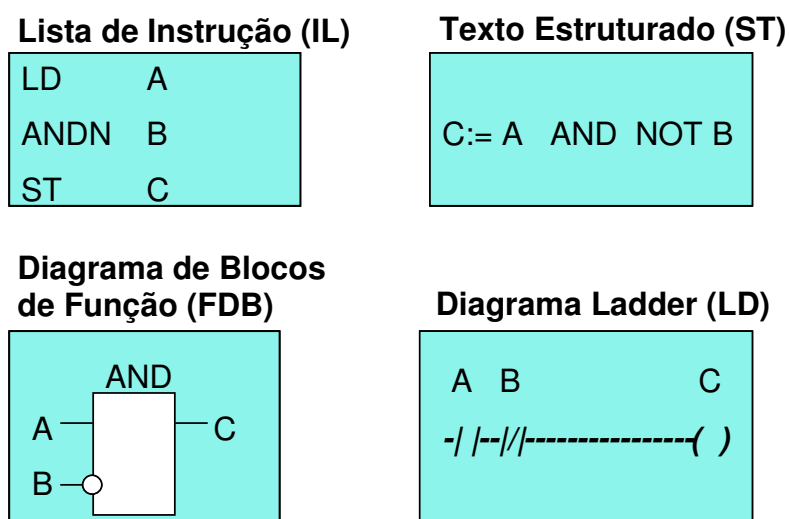



Figura. 8.6.: As quatro linguagens descrevem a mesma lógica de programa..

A escolha da linguagem de programação para um sistema depende:

- da formação do programador;
- do problema a resolver;
- do nível da descrição do problema;
- da estrutura do sistema de controle;
- da interface com outras pessoas/departamentos.

Todas as quatro linguagens são interligadas: elas proporcionam uma plataforma comum com uma ligação com a experiência existente. Neste sentido, elas também funcionam como uma ferramenta de comunicação, integrando pessoas de diferentes formações.

Diagrama "*Ladder*" tem sua origem nos EUA e baseia-se na representação gráfica da Lógica de Relés.

Lista de Instruções é a contraparte européia. Como uma linguagem textual, se assemelha ao "*assembler*".

Diagrama de Blocos Funcionais é muito usada na indústria de processos. Expressa o comportamento de funções, blocos funcionais e programas como um conjunto de blocos gráficos interligados, assim como nos diagramas de circuitos eletrônicos. É parecido com um sistema no que diz respeito ao fluxo de sinais entre elementos de processamento.

Texto Estruturado é uma linguagem de alto nível, muito poderosa, com raízes em Ada, Pascal e "C". Contém todos os elementos essenciais de uma linguagem de programação moderna, incluindo condicionais (IF-THEN-ELSE e CASE OF) e interações (FOR, WHILE e REPEAT). Estes elementos também podem ser agrupados. Esta linguagem é excelente para a definição de blocos funcionais complexos que podem ser usados em qualquer outra linguagem IEC.

```
I:=25;
WHILE J<5 DO
        Z:= F(I+J);
END_WHILE

IF B_1 THEN
        %QW100:= INT_TO_BCD(Display)
ENDIF

CASE  TW OF
        1,5:    TEMP := TEMP_1;
        2:      TEMP := 40;
        4:      TEMP := FTMP(TEMP_2);
ELSE
        TEMP := 0;
        B_ERROR :=1;
END_CASE
```

Figura. 8.7.: Exemplo de aplicação em texto estruturado ST.

O atendimento completo às exigências da norma IEC 61131-3 não é simples. Por esta razão, a norma permite a implementação parcial em vários aspectos. Isto cobre o

número de linguagens, funções e blocos funcionais suportados. Também confere maior liberdade para os fabricantes, mas os usuários devem ficar atentos durante o processo de seleção. Novas versões também podem ter um nível de implementação dramaticamente alto.

Muitos ambientes de programação baseados na IEC 61131-3 oferecem tudo o que é esperado: uso do mouse, menus, telas gráficas, suporte para múltiplas janelas, uso de hipertexto, verificação durante a programação.
No entanto, estas propriedades são características não definidas pela norma e um ponto onde os fabricantes podem se diferenciar.
As implicações técnicas da norma IEC 61131-3 são muitas, deixando bastante espaço para o crescimento e diferenciação. Isto torna a norma propensa a evoluir muito nos próximos anos.

8.5 Os benefícios proporcionados pela norma IEC 61131-3.

A norma IEC 61131-3 causará um grande impacto em toda indústria de controle industrial. Certamente não ficará restrita ao mercado de CLP's convencionais. Atualmente foi adotada no mercado de *Motion Controll*, sistemas distribuídos e sistemas de controle baseados em *PC/Softlogic*, incluindo pacotes SCADA.
Ter uma norma sobre uma ampla área de aplicação proporciona muitos benefícios para os usuários e programadores. Os benefícios da adoção da norma IEC 61131-3 são vários. Alguns exemplos são:

- Redução do desperdício de recursos humanos no treinamento, depuração, manutenção e consultoria.
- Destinar maior atenção para a solução de problemas através da reutilização de software em alto nível.
- Eliminação de erros e dificuldade de entendimento.
- Utilização de melhores técnicas de programação em um ambiente mais amplo: indústria de controle e geral.
- Combinação de diferentes componentes de programas, empresas e, até mesmo, países.

Originalmente, a norma IEC 61131-3 era fortemente suportada e impulsionada pelos pequenos e médios fabricantes, pois eles eram mais afetados pela falta de padronização. Devido ao domínio dos grandes fabricantes europeus, americanos e japoneses, os usuários dos controladores sentiam-se inseguros em adotar uma solução exclusiva de um pequeno fabricante contra um mais representativo, que detinha uma padronização já difundida no mercado e consequentemente, profissionais disponíveis para desenvolver programas.
Através do apelo de um produto baseado numa norma, os pequenos fabricantes sentiram que eles poderiam oferecer uma forte alternativa. Num segundo momento, os pequenos e também os grandes fabricantes sentiram a necessidade de cooperar, quando os usuários passaram aderir e a exigir normas e padrões.
Os principais beneficiários da norma, no entanto, foram os usuários, por causa da possibilidade de trocar de fabricante ou até mesmo lidar com fornecedores diferentes

sem grande impacto, uma vez que seus profissionais e colaboradores puderam migrar de plataforma mantendo o conhecimento nas linguagens adotadas e aplicações em seus processos.

Hoje, os principais fabricantes de CLP´s já anunciam a compatibilidade com a norma IEC 61131-3 entre as descrições técnicas de seus produtos. Porém, a grande perspectiva dos usuários hoje é adquirir um sistema de programação para ser utilizado com qualquer controlador ou, até mesmo, substituir um controlador de determinado fabricante e utilizar o programa existente no controlador de um outro fabricante.

Naturalmente, as normas devem ser dinâmicas e acompanhar as necessidades e os avanços tecnológicos. Hoje, a tendência dos sistemas é se tornarem mais distribuídos e com mais processamento paralelo. Portanto, novas normas estão em desenvolvimento, tais como a norma de Blocos Funcionais IEC 61499.

Novas normas não irão substituir a IEC 61131-3, mas sim trabalhar em conjunto , complementando- se umas às outras.

8.6 A contribuição da PLCopen para a norma IEC 61131-3.

A PLCopen é uma associação mundial de produto independente que foi fundada em 1992 e é sediada na Holanda.

Sua missão é ser líder nas resoluções de tópicos relacionados a programação do controle, com a finalidade de dar suporte ao uso dos padrões internacionais.

Para isso, a organização criou diversos comitês técnicos e promocionais. Como a associação PLCopen depende financeiramente das taxas de seus associados, permite uma sociedade multi-nível, variando de fornecedores aos institutos educacionais. PLCopen suporta fortemente a comunidade de usuários finais e, para isso, criou categorias adicionais da sociedade. Uma das atividades principais da PLCopen está focada em torno da IEC 61131-3, o único padrão global para a programação industrial do controle.

Destacam-se os atuais comitês que a PLCopen patrocina:

TC1 – Normas: através de dados coletados do usuário são avaliadas possíveis inclusões ou modificações das normas;

TC2 – Blocos de Funções: define bibliotecas comuns de FB´s para diversas áreas de aplicações específicas. Esse trabalho, proporciona uma visualização e entendimento comum para os usuários que são programadores e para equipes de implantação e manutenção. Com múltiplas implementações desta biblioteca, a reutilização de software e a escala dos sistemas de controle são muito mais fáceis, mesmo através de diferentes arquiteturas e marcas de controladores.

TC3 – Certificação: mecanismo para certificar fabricantes e produtos;

TC4 – Comunicação: s trabalha na relação entre a comunicação e as linguagens de programação, tal como o mapeamento do Profibus e CANopen via IEC 61131-5 sobre a IEC 61131-3.

TC5 – Software de Segurança: prepara recomendações para a aplicação da norma IEC 61131-3 numa adaptação para aplicações de alta confiabilidade (Safety Systems), especialmente nas novas normas para sistemas seguros IEC 61508 e 61511.

TC6 – XML (*Extensible Markup Language*): em potuguês, **linguagem de marcação extensivel.** Este comitê técnico trabalha na especificação de esquemas XML para todas as linguagens, assim como projetos inteiros. Esta especificação proporcionará a base para intercâmbio, assim como a integração com outras ferramentas de software, o que inclui ferramentas de desenvolvimento de alto nível, ferramentas de documentação e validação.

A norma IEC 61131-3 ainda está em desenvolvimento, necessita de melhorias e muitos desafios ainda virão para provar sua eficácia. Porém, ela já pode ser considerada vitoriosa devido aos benefícios trazidos pelo desenvolvimento de padrões, assim como sua difusão e adoção pelos principais fabricantes de controladores e, principalmente, por oferecer mais qualidade e transparência aos usuários finais.

9 ESTUDO DE CASO

A criação da plataforma de automação apresentada neste estudo de caso foi fruto de uma pesquisa de mercado, entre diversos fornecedores de tecnologia de CLP's e redes de comunicação e controle.

O objetivo deste trabalho foi criar uma plataforma de padronização para ser utilizada nas células da linha de montagem de carrocerias para o a próxima família de veículos da Volkswagem do Brasil, intitulada VW23x (ou "Gol NF").

Esta arquitetura foi desenvolvida pela empresa *Phoenix Contact GmbH & Co. KG*, em parceria com a engenharia da *AUDI GmbH e Volkswagen do Brasil,* e foi adotada para ser a plataforma de novos projetos pela *AUDI GmbH*, empresa do grupo *Volkswagen, e VW Brasil*.

As premissas para o desenvolvimento deste padrão de programação foram:

1. Reduzir o tempo de desenvolvimento de programas de controle de células com a adoção de blocos funcionais e "*templates*" de programação;
2. Adotar uma estrutura de programação que facilitem a depuração de falhas durante a produção pela equipe de manutenção;
3. Adotar a linguagem SFC como estrutura principal do sistema para reduzir o tempo de modelagem e facilitar a programação conforme seqüência de processo.
4. Reduzir o tempo de colocação em funcionamento ("*start-up")* na fase de implantação;
5. Reduzir o custo total do investimento com a automação;
6. Controlador principal com linguagens de programação conforme a IEC-61131-3.
7. Rede de controle da alta performance e imune a interferências eletromagnéticas, próprias em ambientes de processo de soldagem (utilização de fibra ótica como meio físico);
8. Integração da rede de dispositivos de entradas e saídas de controle de processo e de dispositivos de segurança;

9. Desenvolver uma plataforma de automação que servirá para futuras aplicações em novas linhas de montagem de carrocerias automotivas e outras instalações;

As arquiteturas de software e hardware resultantes deste estudo são resultantes de uma busca por um sistema dedicado às necessidades da automação de células de montagem de carrocerias tendo como objetivo a redução de custo no projeto, e melhor performance durante a vida útil das instalações.
Podem-se citar os principais custos de acordo com as diferentes fazes do ciclo de vida de um projeto de automação:

1. Custos de aquisição do hardware: O investimento com os equipamentos responsáveis pelo controle, aquisição dos dados e dos atuadores.
2. Custos de planejamento e engenharia: A mão de obra para o desenvolvimento do software de acordo com os requisitos do projeto.
3. Custos de Instalação:
4. Custos de “start-up” (colocação em funcionamento):
5. Custos de manutenção e reparo:

9.1 Descrição do processo:

A célula apresentada é de baixa complexidade e, por isso, apresenta de forma mais clara e objetiva as principais características da aplicação da arquitetura adotada em células de montagem de carrocerias.

A Figura 9.1 apresenta o layout da célula de montagem das longarinas com o assoalho inferior da carroceria.

A figura 9.2 mostra a instalação (operação 100) onde se observam os dispositivos de fixação e posicionamento RPS.

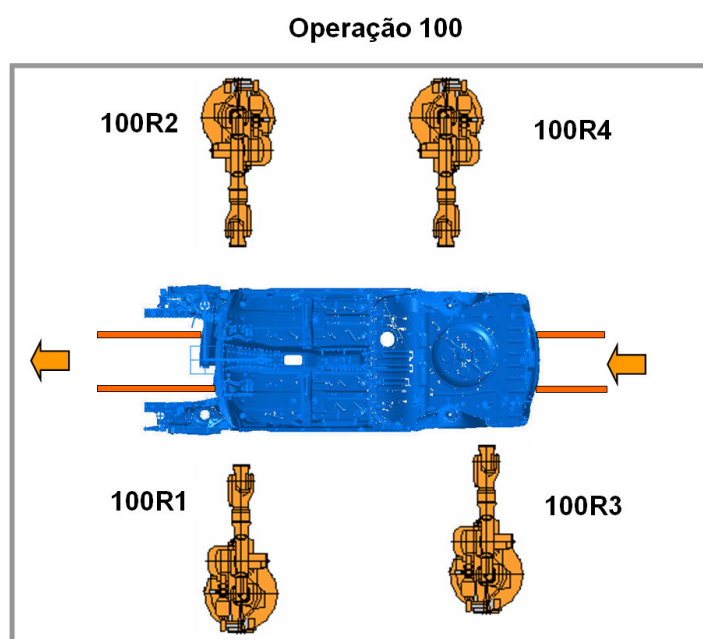



Fig 9.1.: Layout da célula denominada operação 100, onde os robôs 100R1, 100R2 realizam a aplicação de solda ponto, 100R3 solda MIG e o 100R4 aplicação de adesivo estrutural.

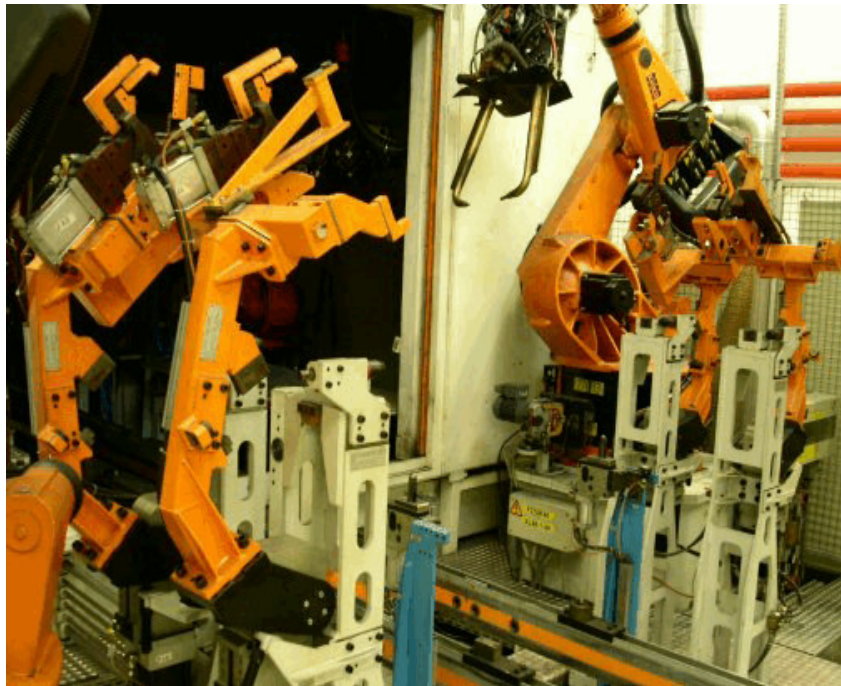



Fig 9.2.: Dispositivos de fixação e controle de dimensional RPS.

9.2 Arquitetura de controle da célula

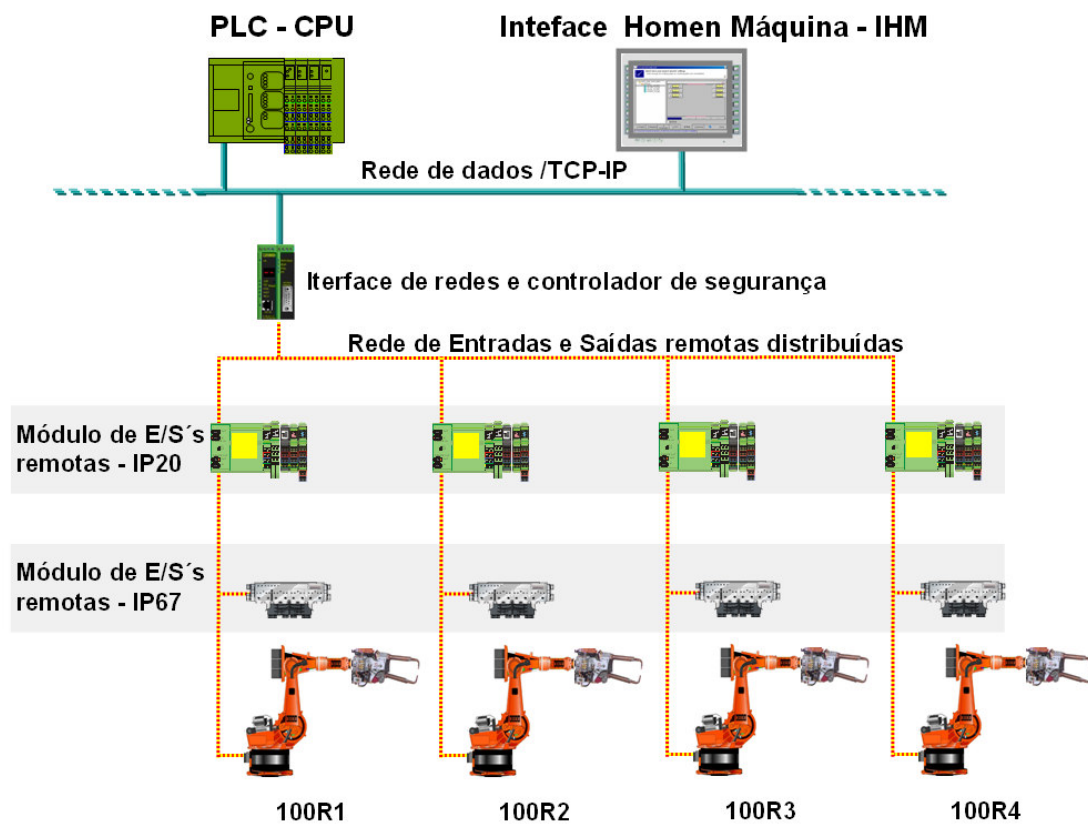



Figura 9.3.: Arquitetura de hardware.

9.3 Arquitetura de software

O Controlador adotado nesta plataforma, foi o modelo ILC 390 (Phoenix Contact) Muito embora este padrão de programação seja uma aplicação dedicada a este CLP específico, ela poderia ser utilizada em qualquer controlador de outro fabricante com as mesmas características de hardware e de software de programação que atenda a IEC-61131-3.

9.3.1 Estrutura principal em SFC (*Sequential Flow Chart*):

Na avaliação apurada de especialistas, todas as linguagens atuais de programação utilizadas apresentam falhas ao tentar suprir todas as necessidades. No entanto, a SFC provou ser a melhor das ferramentas estabelecidas, permitindo, por exemplo, uma representação direta do comportamento simultâneo no modelo de programação.

O nosso estudo de caso demonstra uma aplicação prática da padronização de linguagem de programação e da aplicação do SFC em controle de células automáticas. Ele apresenta a descrição da instalação que se pretende controlar e a descrição dos diversos níveis onde serão aplicadas as linguagens previstas na IEC-61131-3.

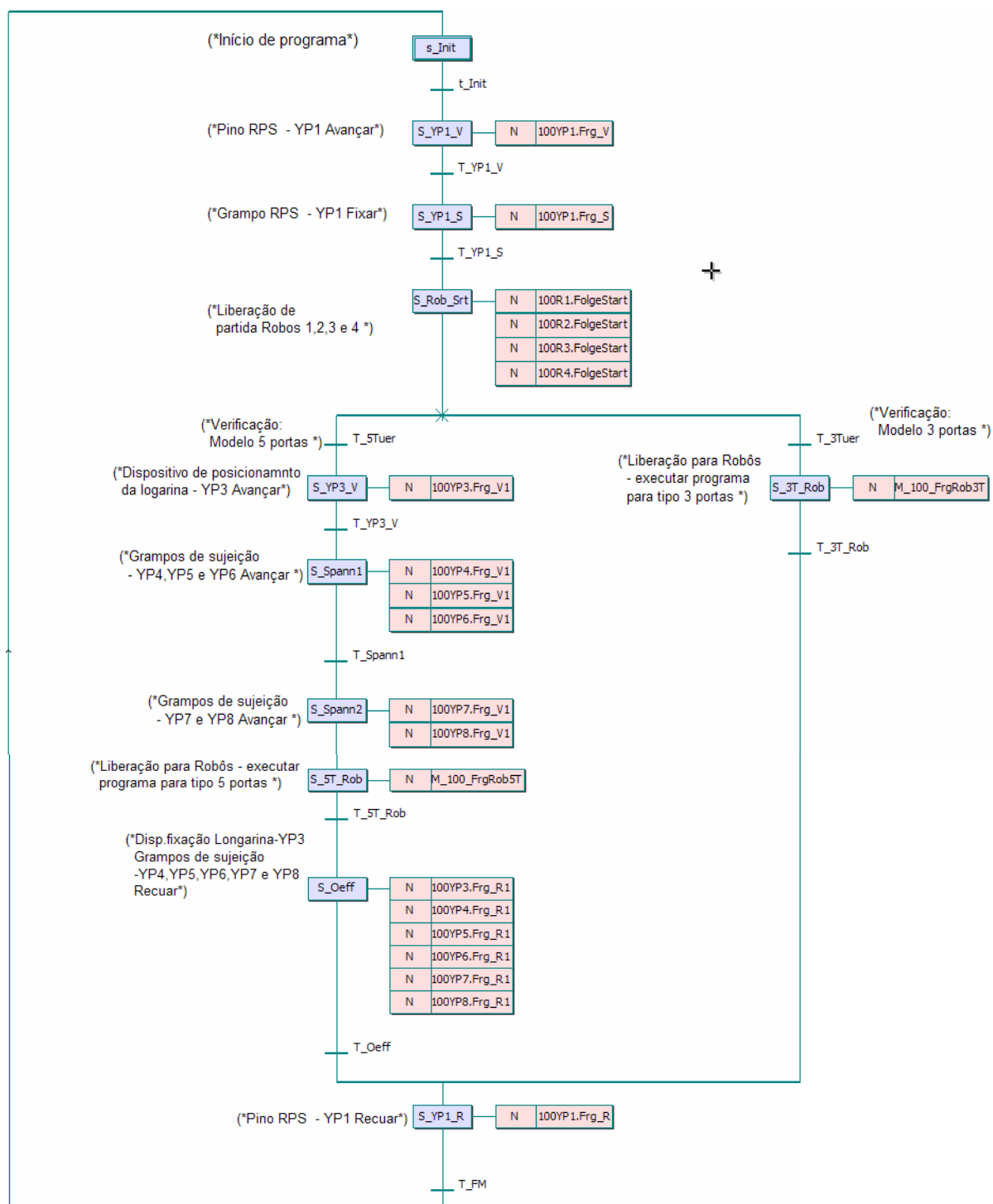



Fig 9.4.: Estrutura principal em SFC.

9.3.2 Blocos funcionais (*funtion bocks*)

Os Blocos funcionais exercem um papel fundamental nesta plataforma, pois possibilitam a portabilidade e modularidade do programa. Uma vez que os blocos funcionais têm seu funcionamento comprovado e depurado, poderão ser aplicados em quaisquer instalações, sempre que necessário, configurando apenas as entradas e as saídas. O resultado final é um software de programção mais confiável e com tempo reduzido para desenvolvimento em novos projetos.

Nas figuras seguintes 9.5, 9.7 e 9.8 são aprsentados alguns blocos de função específico para controle dos dispositivos de junção no processo de montagem.

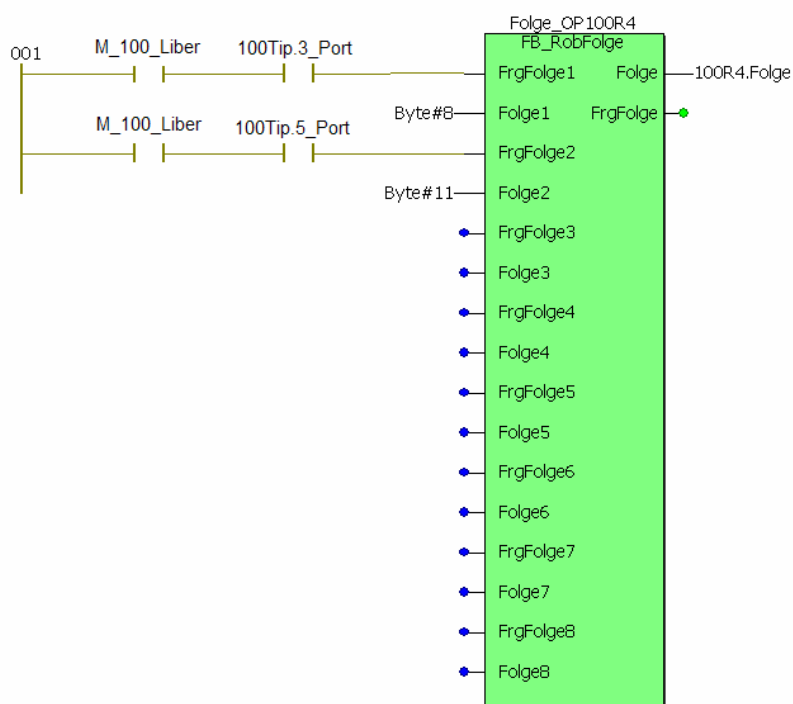



Fig 9.5.: Bloco de função FB ROB_FOLGE – Seleção de programa para robô conforme tipo a ser produzido.

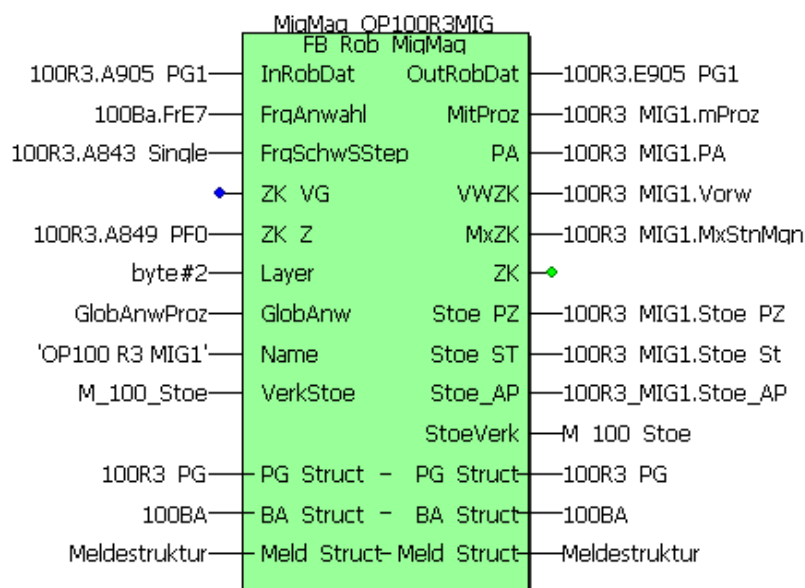



Fig 9.6.: Bloco de função FB ROB MIG/MAG – Bloco de controle do robô 100R3 na aplicação de solda MIG.

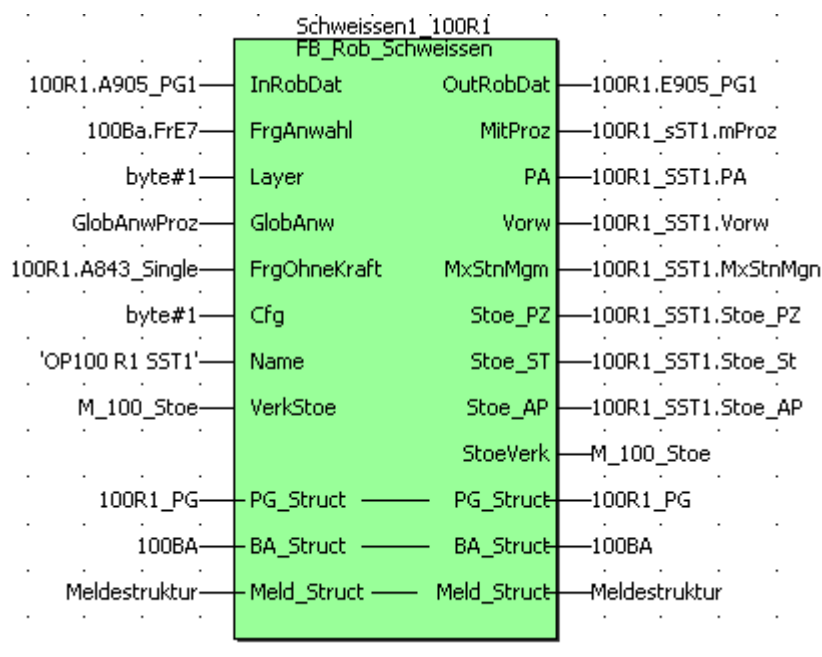



Fig 9.7.: Bloco de função FB ROB KLEBEN – Bloco de controle do robô 100R4 na aplicação de adesivo.

10 CONCLUSÂO:

A busca pela melhor arquitetura de automação para células de montagem de carrocerias automotivas levou a um trabalho realizado em parceria com a *VW do Brasil, AUDI GmbH e a Phoenix Contact GmbH* que desenvolveram uma estrutura de controle padronizada para servir de plataforma para futuras instalações, muitoembora esta solução também está disponível através de outros fornecedores de tecnologias.

Espera-se que as vantagens propostas na solução de automação apresentada no estudo de caso sejam comprovas até o final da fase de implantação do projeto VW 23x, muito embora, algumas das soluções adotadas tenham sido comprovadas em outras plantas do Grupo VW. Com o resultado deste desenvolvimento espera-se uma grande vantagem econômica em todo o ciclo de vida das instalações e dos produtos montados.

A utilização da norma IEC 61131-3 apresentou modernas ferramentas para estruturação de software de programação de CLP's.

As partes essenciais para uma estruturação de programação adequada são as linguagens SFC (Sequenciamento Gráfico de Funções) e os Blocos Funcionais (Function Blocks) definidos pelo usuário. Ambas proporcionaram uma excelente forma para decomposição da aplicação de controle em unidades facilmente gerenciáveis. Estas unidades foram de fácil utilização e entendimento por diversos usuários de diferentes formações. Tais unidades também permitiram que se estabelecesse o elo entre os engenheiros de sistemas, desenvolvedores de software e as equipes de implantação, operação e manutenção.

Além disso, elas funcionaram como uma importante ferramenta de representação e comunicação para estes grupos de formações e responsabilidades tão distintas. Para tanto, as equipes de programadores desenvolveram bibliotecas de blocos de funções, a fim de proporcionar às novas implantações o menor custo de desenvolvimento da lógica de controle.

Disso tudo, resultou uma estrutura de programação mais fácil de se entender e de ser reutilizada, proporcionando uma separação melhor das responsabilidades dos diversos usuários, programadores e equipes de implantação e manutenção.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARC–Advisory Group Consulting, consulta na internet em 10/2006: http://www.arcweb.com.

AWS – American Welding Society Welding Handbook – v. 2 – 8th ed., 1995.

BARAD, Miryam and Sipper, Daniel. "Flexibility im Manufacturing Systems: definition and Petri net modeling". Int. Journal Prod. Res., vol.26, nº 2, pp. 237-248, 1988.

BATALHA, G. Notas de aula em <www.poli.usp.br/PMR/lefa>. Acesso em 15/04/2006.

BATALHA, G.F., Schwarzwald R.C., G.L. Damoulis, "New trends in computer simulation as integrated tool for automotive components de velopment", in: Proceedings of the Eighth NUMIFORM, Columbus, OH, 2004, ISBN 0735401896 (in CD)".

BIRCH, R. S., Alves, M. Dynamic failure on structural joint systems. Thin Walled Structures, v.36; n. 2, p.137-154, jan. 2000.

CAMARINHA, Matos, H. Afsarmanesh "Balanced Automation Systems Architectures and Design Methods", (L.M. - Editores), Chapman & Hall, ISBN 0412-72200-3, IFIP Vol. 20, Jul. 95.

CASSANDRAS, Christos G., "Discrete Event Systems: Modeling and Performance Analysis",1993.

CASSANDRAS, Christos G., "Introduction to Discrete Event Systems", 1999.

CASTRUCCI, P.L.; Moraes, C.C "Engenharia de Automação Industrial" LTC Livros Técnicos e Científicos Editores S.A. 2001.

CHETTY, O. V. Krishnaiah and GNANASEKARAN, O. C.. "Modelling, Simulation and Scheduling of Flexible Assembly Systems with Coloured Petri Nets". The Int. J. Advanced Manufacturing Technology, vol. 11 pp. 430-438, 1996.

DICESARE, F., Harhalakis, G., Proth, J. M., Silva, M., and Vernadat, F. B. (1993). "Practice of Petri nets in Manufacturing". Chapman & Hall, New York, first edition. 1993.

DONATH, M., GRAVES, R.J., and Carlson, D.A., "Flexible assembly systems: the scheduling problem for multiple products". Journal of Manufacturing Systems, 1989.

Economy. Technological Forecasting and Social Change, nr. 35, pág. 167-177, 1989.

EDLER, Dietmar and Ribakova, Tatjana. "The Impact of Industrial Robots on the Level and Structure of Employment in Germany – A Simulation Study for the Period 1980 – 2000". Technological Forecasting and Social Change, nr. 45, pág. 255-274, 1994.

E. VAN DER WAL, PLCOPEN website: <www.plcopen.com>, Acesso em 15/04/2006.

FLINCHBAUGH J., Winter, "Using Integrated Management Systems to Design a Lean Factory", Center for Quality of Management Journal, Vol. 7, No. 2, p 23-30, 1998.

GOLDHAR, J.D. "What Flexible Automation Means to Your Business", Modern Material Handling, Vol. 39 No.7 September, (1984).

GROOVER, Mikell P.. "Automation Production Systems and Computer Integrated Manufacturing". Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, 1987.

GUPTA Yash P. and Goyal Sameer. Flexibility of Manufacturing Systems: Concepts and measurements. European J. of Operations Research, vol.43, nº 2, pp. 119-135, 1989.

HARIS, Rick 2001, "Criando o fluxo contínuo".

IFR - Federação Internacional de Robótica, "World Robotics 2000", editado pela e pela ONU (Organização das Nações Unidas), 2000.

ISHTANI, Hisashi, KAYA, Yoichi. "Robotization in Japanese Manufacturing Industries. Technological Forecasting and Social Change", nr. 35, pág. 97-131, 1989.

IWU – Fraunhofer Institute "Annual Report 2003"– Chemnitz, Alemanha, 2003.

J.K, LARSON, "The use of Nd:YAG lasers in future automotive applications, in: M. Geiger, F. Vollertsen (Eds.), Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proceedings of the LANE'97, Meisenbach",1997.

KUSIAK, A., "Flexible Manufacturing Systems: A Strutural approach. Int". J. Production Research., vol. 23, nº 6, pp. 1057-1073, 1985.

LEWIS, RWI "Programing Industrial Control Using IEC 1131-3 – IEE CONTROL", 1995.

MAGALHÃES, Cícero C de, "Engenharia de automação Industrial", 2001.

MARQUES, Rosa Maria. "O impacto da automação microeletrônica na organização do trabalho em duas montadoras brasileiras". Revista de Economia Política, vol. 10, nr. 3 (39), julho-setembro, 1990.

MAIMON, O. LAST, M. "FMS control design: an information value approach"
Journal Journal of Intelligent Manufacturing Publisher Springer Netherlands
ISSN 0956-5515 (Print) 1572-8145 (Online) Pages 123-132, 1987.

MIYAGI, Paulo Eigi "Controle Programável – Fundamentos do Controle de Eventos Discretos", 1996.

MOREIRA, Daniel A., "Administração da Produção "e Operações Editora Pioneira, São Paulo 1993.

NORMA IEC 1131-3: "PLC's Programming Languages" – Part 3, 2003.

OLIVEIRA, J. E. L. Introdução a Automação Robotizada. Centro Universitário Selesiano de São Paulo. Unisal, campus Americana. Disponível em: www.cptec.br/stm-4/pdf/auto2.pdf. Acessado em 01 de setembro de 2004.

PAPADOPOULOS, H. T.; HEAVEY C. and BROWNE J.. "Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design". Chapman & Hall, ISBN 0 412 38720 4, USA.

PARK, E., TILBURY, D. M., and KHARGONEKAR, P. P, "A Modeling and Analysis Methodology for Modular Logic Controllers of Machining Systems with Auto, Hand, and Manual Con trol Modes." In Proc. 2000 American Control Conference, Chicago, 2000.

PAUL, R.P., "Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control", The MIT Press, Massachusetts, 1981.

PORTO, José Vieira, "Desenvolvimento de um método de integração do planejamento doprocesso de fabricação e do planejamento e controle da produção, baseado na flexibilidade do processo de fabricação". Tese submetida à escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São

Paulo como requisito para a obtenção do título de doutor em Engenharia, São Carlos, 1990.

PIRES, J. Norberto, “Robótica das Máquinas Gregas à Moderna Robótica Industrial” publicado no Jornal Público, caderno de Computadores de 1 e 8 de Julho de 2002

PRESSMAN, Roger, “Software Engineering: A Practitioner’s Approach”, 3. ed. New York: McGraw-Hill, Inc., New York, 1992.

RIVIN, E., “Mechanical Design of Robots”. 1ª ed., McGraw-Hill Inc., New York, 1988.

R.DAVID, “Grafcet: A powerful tool for specification of logic controllers,” IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 3, pp. 253–268, Sept. 1995.

REMBOLD, U., LAENGLE, T., LÜTH, T.: “A Distributed Control Architecture for Autonomous Robot Systems”. 1994.

SABUNCUOGLU, Ihsan and HOMMERTZHEIM, Don L.. “Dynamic Dispatching Algoritm for Scheduling Machines and Automated Guided Vehicles in a Flexible Manufacturing System”. Int. Journal of Production Research, vol. 30, nº 5, pp. 1050-1079, 1992.

SAITO, NAKANAMURA. “Impacts of Robotization on the Japanese”.

SCIAVICCO, Lorenzo et al. Modeling and Control of Robot Manipulators. 1996. Universidade de Nápoles Federico II. Nápoles, Itália.

SPONG, Mark W. et al. Robot Dynamics and Control. 1989.

SURI, R. and WHITNWY C., “Decision Support Requeriments in Flexible Manufacturing. Journal of Manufacturing Systems”, vol. 3, nº 1, pp. 27-38, 1984.

TANI, Akira. International Comparisons of Industrial Robot Penetration. Technological Forecasting and Social Change, nr. 34, pág. 191-210, 1989.

TAUILE, José Ricardo. ‘Microeletrônica e automação: a nova fase da indústria automobilística brasileira. Revista de Economia Política”, vol. 6, nº 3, julho- setembro, 1986.

TCHIJOV, Iouri. CIM Introduction: “Some Socioeconomic Aspects. Technological Forecasting and Social Change”, nr. 35, pág. 261-275, 1989.

TORII, Yasuhiko. “Robotization in Korea: Trend and Implications for Industrial Development. Technological Forecasting and Social Change’, nr. 35, pág. 179-190, 1989.

TUBINO, Dalvio Ferrari. Manual de Planejamento e Controle da Produção. Editora Atlas1997

VAGHEFI M.R., Wood L.A., & Huellmantel A., 2001, "Toyota Story 2: StillWinning the Productivity Game", Annual Meeting of the Iranian Academic Association, Tehran, Iran.

WARNOCK, I., Programmable Controllers: Operation and Application, Prentice Hall, 1997.

WOBBE, Werner, “Anthropocentric Production Systems: a strategie issue for Europe”, APS Research Papers, CEC/FAST, vol. 1, FOP 245, Bruxelles: CEC – 1991.

ZHOU, DICESARE “Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufactur”- 1993